

Luiz Tauffer

**APLICAÇÃO DE MODELOS OCULTOS DE MARKOV NA
SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PROCESSOS
COMPORTAMENTAIS CONTÍNUOS: UM ESTUDO DE CASO
SOBRE COMPORTAMENTO INGESTIVO EM POMBOS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Marino Neto

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tauffer, Luiz

Aplicação de modelos ocultos de Markov na segmentação e
classificação de processos comportamentais contínuos : um
estudo de caso sobre comportamento ingestivo em pombos /
Luiz Tauffer ; orientador, José Marino Neto -
Florianópolis, SC, 2013.
110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Classificação comportamental.
3. Modelos ocultos de Markov. 4. Sistema para registro
automático. I. Neto, José Marino. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Luiz Tauffer

**APLICAÇÃO DE MODELOS OCULTOS DE MARKOV NA
SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PROCESSOS
COMPORTAMENTAIS CONTÍNUOS: UM ESTUDO DE CASO
SOBRE COMPORTAMENTO INGESTIVO EM POMBOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 4 de junho de 2013.

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. José Marino Neto, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Daniela Ota Hisayasu Suzuki, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Mendes Azevedo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha
família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do Instituto de Engenharia Biomédica pelas disciplinas ministradas no decorrer do primeiro ano do mestrado. Destes, gostaria de agradecer especialmente ao professor José Marino Neto não só pelo respeito e paciência dedicados a mim durante a orientação deste trabalho, mas também pelo exemplo de postura profissional e de pensamento crítico. Agradeço a Yasser Issmail pela parceria na realização deste trabalho.

Gostaria também de lembrar dos meus amigos de mestrado, tanto colegas de laboratório quanto de disciplinas, que conviveram comigo diariamente e partilharam das frustrações e regozijos da nem sempre ingrata vida de mestrando. Em especial agradeço à Júlia, de indefectível companheirismo ao longo dos dois últimos anos.

Aos meus irmãos, pai, mãe e avó, que mesmo distantes fisicamente, são a verdadeira força motriz dos meus dias.

*Dijo Tennyson que si pudiéramos comprender una
sola flor sabríamos quiénes somos y qué es el mundo.*
(Jorge Luis Borges, 1949)

RESUMO

Além da classificação comportamental, a definição de unidades descritivas da motivação animal pode ser valiosa aos estudos em animais. Um sistema para registro automático da atividade alimentar de pombos foi projetado, montado e testado em experimentos com 5 horas de duração onde os animais foram submetidos a quatro manipulações alimentares distintas envolvendo estímulos hedônicos e metabólicos. O sistema é baseado em sensores de força, o que permite o acompanhamento da evolução do perfil ingestivo ao longo de um experimento, bem como a identificação dos momentos de ocorrência dos eventos ingestivos. A marcação temporal destes eventos torna possível a utilização de métodos de agrupamento de dados como os modelos ocultos de Markov para a classificação do comportamento alimentar em termos de episódios ingestivos. Esta técnica, quando comparada à metodologia tradicional de agrupamento por pontos-critério fixos, se mostrou mais adequada para aplicação nos dados de ações alimentares dos pombos. Uma segunda etapa de classificação buscou segmentar a motivação alimentar dos animais em três graus distintos de interesse pela ração/água, em oposição à tradicional segmentação em refeições. Os resultados sugerem que estímulos de natureza metabólica aumentam momentaneamente a eficiência na ingestão de ração e água no estado de alto interesse e diminuem a eficiência no estado de baixo interesse, enquanto que estímulos hedônicos tendem a aumentar tanto a ingestão de ração quanto o tempo dedicado ao estado de alto interesse. A segmentação da análise dos dados em resultados acumulados a cada duas horas indicou a ocorrência de períodos de quiescência na ingestão de ração. Entretanto, estes períodos de duas horas também mascaram dinâmicas internas de alteração da motivação alimentar. A metodologia empregada permitiu a caracterização de estruturas motivacionais a partir de unidades comportamentais simples, durações de episódios ingestivos e intervalos entre estes. Estas informações, porém, parecem não ser suficientes para classificação do fluxo motivacional subjacente à Sequência Comportamental de Saciedade em três condições plenas e duradouras; dados de quantidades ingeridas e indicadores de agitação corporal poderiam fortalecer os modelos nesta direção.

Palavras-chave: Classificação comportamental e motivacional. Modelos ocultos de Markov. Sistema para registro automático.

ABSTRACT

Beyond the behavioral classification, defining unities that describe the motivation can be of great value for the studies in animals. A system for automatic recording of the pigeons' food-directed activities was designed, assembled and tested in 5-hours duration experiments where the animals were submitted to four different dietary manipulations involving hedonic and metabolic stimulus. The system is based on force sensors, which allows to follow the evolution of the animals' feeding profile together with the identification of occurrence of the food-directed actions. The temporal tagging of these events makes it possible to use clustering methods such as Hidden Markov Models for the classification of the feeding behavior in terms of feeding episodes. This technique, when compared to the traditional methodology of clustering by fixed-point criterion, showed to be more suitable for the pigeons' feeding data. A second stage of classification segmented the animals' feeding motivation into three different conditions, differently of the traditional clustering into meals. The results suggest that metabolic stimuli increase momentarily the food and water intake efficiency at the state of high interest and decrease the efficiency at the state of low interest, whereas hedonic stimuli tend to increase both the amount of food intake and the time spent at the state of high interest. Segmenting the analysis into 2-hours cumulated results indicated the occurrence of quiescence periods in food intake. However, the 2-hours periods also mask inner dynamics of motivational changes. The employed methodology allowed the characterization of motivational structures from simple behavioral unities, feeding episodes durations and intervals between them. These information, however, do not seem to be sufficient for the classification of the motivational flow underlying the behavioral satiety sequence into three plain and long-lasting stages; the amount ingested and indicators of physical agitation could strengthen the models on this regard.

Keywords: Behavioral and motivational classification. Hidden Markov Models. System for automatic recording.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma cadeia de Markov com três estados.	32
Figura 2 - Estrutura de um MOM com dois estados e densidade de observações contínua.	34
Figura 3 - Estados estimados a partir de uma sequência de observações.	34
Figura 4 - Diagrama esquemático das etapas do sistema de aquisição e registro de atividade ingestiva.	43
Figura 5 - Transdutor e Montagem transdutor/comedouro junto às gaiolas.	44
Figura 6 - Diagrama esquemático da etapa de pré-tratamento do sinal	45
Figura 7 - Protocolo de montagem de pacotes	46
Figura 8 - Interface gráfica da funcionalidade de calibração do software.	47
Figura 9 - Interface gráfica da funcionalidade de registro do software.	48
Figura 10 - Frequência relativa de ocorrência dos IEB no grupo CR	51
Figura 11 - Estrutura do modelo oculto de Markov com dois estados	53
Figura 12 - Estrutura do MOM para agrupamento em estados motivacionais.	55
Figura 13 - Resultado da medição de diferentes pesos no mesmo transdutor.	57
Figura 14 - Sinal original proveniente de alimentador com ração.	58
Figura 15 - Perfil característico do sinal proveniente do comedouro com ração e identificação dos eventos ingestivos	59
Figura 16 - Perfil característico do sinal proveniente do comedouro com água e identificação dos eventos ingestivos.	60
Figura 17 - Número de bicadas, consumo médio de ração e consumo médio de água por hora.	62
Figura 18 - A- Ajuste de gaussianas à distribuição de IEB voltados à ração	65
Figura 19 - A- Ajuste de gaussianas à distribuição de IEB voltados à água.	66
Figura 20 - Variação do LogL	67
Figura 21 - Resultados do agrupamento por MOM e por ponto-critério fixo.	69
Figura 22 - Frequência média de ocorrência de episódios de ração/água, tempo médio dedicado aos episódios de ração/água	73
Figura 23 - Resultados do ajuste de curvas para a distribuição de EI e IEE	75
Figura 24 - Resultado da classificação em três estados motivacionais.	76
Figura 25 - Porcentagem de tempo dedicada a cada estado motivacional	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores RMS da incerteza final de medição e desvio médio do valor referência para cada transdutor..	56
Tabela 2 - Resultados dos testes ANOVA duas vias.	63
Tabela 3 - Resultados dos testes ANOVA duas vias para cada método.	70
Tabela 4 - Resultados dos testes-t pareados para comparação entre métodos....	71
Tabela 5 - Resultados dos testes ANOVA duas vias para a classificação em estados.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SCS - Sequência Comportamental de Saciedade

MOM - Modelo Oculto de Markov

PC – Ponto-Critério

FDP - Função Densidade de Probabilidade

IEB - Intervalo Entre Bicadas

EI - Episódio Ingestivo

IEE - Intervalo Entre Episódios

EBI - Estado de Baixo Interesse pela ração/água

EMI - Estado de Médio interesse pela ração/água

EAI - Estado de Alto Interesse pela ração/água

CR - Grupo controle com ração regular

CP - Grupo controle com ração palatável

JR - Grupo em jejum de 24 horas com ração regular

JP - Grupo em jejum de 24 horas com ração palatável

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 MOTIVAÇÃO	23
1.2 JUSTIFICATIVA	24
1.3 OBJETIVOS	31
2. MODELOS OCULTOS DE MARKOV.....	32
2.1 TEORIA E DEFINIÇÕES.....	32
2.2 TRÊS PROBLEMAS BÁSICOS	35
2.2.1 Problema 1	36
2.2.2 Problema 2	37
2.2.3 Problema 3	38
2.3 MOM APLICADOS AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO ANIMAL.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 ANIMAIS E EXPERIMENTOS	42
3.2 SISTEMA DE REGISTRO DE ATIVIDADE INGESTIVA: TRANSDUTORES	43
3.3 SISTEMA DE REGISTRO DE ATIVIDADE INGESTIVA: HARDWARE	45
3.4 SISTEMA DE REGISTRO DE ATIVIDADE INGESTIVA: SOFTWARE	46
4 TRATAMENTO DOS DADOS	49
4.1 DADOS PRIMÁRIOS - ANÁLISE E AGRUPAMENTO	49
4.2 DEFINIÇÃO DE EPISÓDIOS POR MOM.....	52
4.3 DEFINIÇÃO DE ESTADOS MOTIVACIONAIS POR MOM	54
5 RESULTADOS	56
5.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO E REGISTRO	56
5.2 EVENTOS INGESTIVOS E PERFIL ALIMENTAR	58
5.3 AJUSTE DE CURVAS À DISTRIBUIÇÃO DOS INTERVALOS ENTRE BICADAS (IEB)	63
5.4 AGRUPAMENTO EM EPISÓDIOS	67

5.5 AGRUPAMENTO EM ESTADOS MOTIVACIONAIS	74
6 DISCUSSÃO.....	80
7 CONCLUSÕES	86
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXO A - Manual do usuário	94
APÊNDICE A - Folha de dados dos transdutores	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O interesse do animal pelo alimento é modulado por uma complexa cadeia de variáveis ambientais, psicológicas e fisiológicas. Características do meio em que o animal se encontra como, por exemplo, disponibilidade e tipo de alimentos, temperatura, luminosidade e liberdade de movimentação influenciam na motivação à alimentação (GEARY, 2005). Por exemplo, em vertebrados, a presença de possíveis ameaças ou situações incômodas em geral que provoquem algum nível de estresse atuam no sentido de inibir a alimentação (CARR, 2002). Também são conhecidos os efeitos de drogas estimulantes ou inibidoras da ingestão de alimentos (RODGERS; HOLCH; TALLETT, 2010).

O comportamento alimentar não deve ser entendido como isolado, mas participante de uma cadeia complexa conhecida como Sequência Comportamental de Saciedade (SCS), que consiste em uma sequência temporal de eventos comportamentais que sucedem a ingestão de alimentos envolvendo alterações na ingestão de água, em comportamentos relacionados à termorregulação, manutenção (como auto-limpeza) e sono (HALFORD; WANNINAYAKE; BLUNDELL, 1998; RODGERS; HOLCH; TALLETT, 2010).

O Laboratório de Neurofisiologia Comparada da UFSC vem examinando a atuação de circuitos serotoninérgicos (CAMPANELLA et al., 2009; DA SILVA et al., 2004, 2007; DOS SANTOS et al., 2009; HÄCKL et al., 2005; STEFFENS et al., 1997), além dos efeitos da injeção intracerebral de adrenalina e noradrenalina (HAGEMANN et al., 1998) e orexinas (DA SILVA et al., 2008) na SCS em pombos. Os trabalhos realizados até então se utilizam de gravações em vídeo da gaiola onde o animal está em experimentação com o pesquisador anotando manualmente ou com auxílio de software (CRISPIM JUNIOR et al., 2012; DOS SANTOS et al., 2011; HOELLER et al., 2013) cada evento à medida que ocorre e, ao fim da classificação, são somados os tempos totais de duração de cada unidade comportamental. Esta forma de trabalho, por ser detalhista e repetitiva, está sujeita ao cansaço humano, mesmo com auxílio de vídeos e softwares para facilitar as anotações. Um sistema automático de registro dos dados ingestivos colaboraria de forma a evitar problemas desta natureza.

Ainda, as informações retiradas destes experimentos, quantidade inicial e final de comida e água e número de ações voltadas ao alimento (bicadas), permitem apenas uma visão limitada das

características comportamentais em questão. O entendimento mais completo da SCS exige métodos de análise que contemplem a evolução temporal do fluxo comportamental, segmentando as várias etapas do mesmo e quantizando de alguma forma estas informações. Por exemplo, uma sequência de bicadas separadas por intervalos menores que três segundos é, atualmente em nosso laboratório, o critério usado para definir um episódio ingestivo. Este critério é empírico e não traz, necessariamente, valor científico relevante.

Procedimentos criteriosos para definição de unidades comportamentais relacionadas à alimentação são, portanto, fundamentais para compreensão mais ampla do comportamento e, por consequência, dos efeitos de fármacos sobre o mesmo (VICKERS; CLIFTON, 2012; ZORRILLA et al., 2005). Métodos de agrupamento de dados podem servir de apoio nesta situação, à medida que propiciam interpretações embasadas estatisticamente na série de dados.

Trabalhos anteriores em nosso laboratório buscaram desenvolver ferramentas para facilitar a aquisição de informações experimentais, por exemplo, por meio do imageamento e rastreamento de objetos (CRISPIM JUNIOR et al., 2012). Também, um sistema de sensoriamento de força para registro de atividade alimentar de pombos já foi desenvolvido e testado (PEREIRA, 2003), porém os instrumentos tiveram sua integridade comprometida por tempo de uso. Estes trabalhos, entretanto, se limitaram à aquisição dos dados e adequação dos mesmos às análises da forma que são feitas atualmente, já citadas.

A proposta do presente trabalho é projetar e implementar um sistema para registro automático de dados alimentares de pombos e incorporar técnicas numéricas para o agrupamento de dados, especificamente as relacionadas aos Modelos Ocultos de Markov (MOM), ao estudo da sequência comportamental de saciedade.

1.2 JUSTIFICATIVA

A SCS é a resultante comportamental das atividades fisiológicas que sucedem a ingestão de alimento (HALFORD; WANNINAYAKE; BLUNDELL, 1998) e, apesar de ser mais extensivamente estudada em roedores (OLIVEIRA; SOUZA; MANHÃES-DE-CASTRO, 2011; RODGERS; HOLCH; TALLETT, 2010), parece ser uma característica comum a outras espécies de vertebrados, incluindo aves (DOS SANTOS et al., 2011; HOELLER et al., 2013).

Investigar a SCS em pombos é interessante, pois os mecanismos serotoninérgicos de controle alimentar presentes nestes animais se

assemelham aos encontrados em mamíferos. Isto, somado ao fato de estes animais estarem relativamente isentos de seleção artificial para determinado fenótipo ingestivo, reforça o uso de pombos como modelos para estudos da SCS (SANTOS, 2012).

Uma forma interessante de analisar padrões comportamentais ingestivos é por meio do estudo dos intervalos entre bicadas (IEB), ou distribuição destes intervalos durante um período de tempo. O movimento de bicada possui a vantagem de ser uma ação clara e direta, o que permite sua identificação por diferentes métodos sem intervenção no animal. Por exemplo, (ZEIGLER; FELDSTEIN, 1971) descrevem um sistema de detecção de bicadas baseado em interrupções de um feixe de luz logo acima à superfície da ração. A desvantagem desta metodologia é a complexidade na disposição dos componentes: o feixe de luz não pode ser interrompido pelo nível de ração e, ao mesmo tempo, deve se postar de tal forma a ser interrompido exatamente uma vez a cada bicada. O mesmo método de detecção é utilizado por (CLIFTON, 1982). (BERTSCH; BECKER, 1973) propõe um mecanismo de identificação mais direta das bicadas usando um auto-falante como sensor ao fundo do alimentador. Este sistema é capaz de identificar as ações por meio das vibrações causadas pela força exercida pelo bico no alimento. Ainda, por meio de registros em vídeos, (ZEIGLER; LEVITT; LEVINE, 1980) investigam detalhadamente a morfologia e padrões do movimento de bicada em pombos.

Estes métodos são capazes de identificar o momento de ocorrência das ações, porém não acompanham a quantidade de alimento ingerido. Por outro lado, um sistema baseado em sensores de força é capaz não só de marcar a ocorrência de bicadas, mas também medir a quantidade de ração ou água dentro do comedouro a cada instante de tempo. Um sistema automatizado de leitura e registro de sinais provenientes de sensores de força sob os comedouros seria capaz de fornecer, sem influência do pesquisador, um banco de dados fundamental para a melhor compreensão do estudo em questão. Informações simples, porém relevantes seriam, por exemplo, quantidade de alimento ou água ingerido a cada instante de tempo, quantidade de bicadas no comedouro e distribuição destas bicadas no tempo.

Ao se observar animais em alimentação *ad libitum*, ou seja, com comida e água sempre disponíveis, além da medição das quantidades de ração e água consumidas, outra questão fundamental para as análises quantitativas dos experimentos é a definição de unidades comportamentais relacionadas à ingestão. A dificuldade na definição destas unidades se dá por conta da natureza contínua dos processos

orgânicos relacionados ao comportamento alimentar, isto é, as ações relativas ao comer e beber estão atreladas a sistemas biológicos de controle não discretos, complexamente interligados e sensíveis a inúmeros fatores externos e internos ao organismo (GEARY, 2005). Ainda, variadas informações podem ser relevantes à caracterização do comportamento alimentar, por exemplo, quantidade de alimento ingerido, tempo dedicado à alimentação, frequência de ocorrência de eventos ingestivos e disposição temporal destes eventos.

Eventos ingestivos são as unidades primárias no estudo do comportamento alimentar. São ações observáveis e mensuráveis, que podem se apresentar de variadas formas em diversos animais. Por exemplo, bicadas são eventos ingestivos típicos de aves, lambar e roer são eventos comuns aos ratos e mastigação e ruminação são comuns às vacas. É a partir do registro destes eventos que dados relativos a tempo, frequência e intensidade são obtidos para utilização de métodos de análise numéricos e estatísticos. Os eventos ingestivos são extremamente relevantes ao estudo do comportamento alimentar pois estão diretamente relacionados às estruturas neuronais de controle mecânico do comportamento. Porém, se analisados isoladamente, pouco contribuem para a compreensão de mecanismos superiores de controle de ritmos e durações comportamentais (GEARY, 2005).

O agrupamento temporal de uma série sucessiva de eventos ingestivos, dentro de critérios preestabelecidos, pode servir para dar significado prático a *episódios ingestivos* (EI). Episódios ingestivos podem ser entendidos como visitas à fonte de recursos separadas por *intervalos entre episódios* (IEE) e que, em casos onde os eventos ingestivos possuem duração desprezível (por exemplo, bicadas possuem durações muito curtas), trazem um significado de tempo relevante às análises comportamentais.

Porém, estes episódios ainda são unidades com pouca robustez temporal, isso é, ocorrem em grande quantidade em espaços de tempo relativamente curtos e possuem durações usualmente curtas. Uma prática tradicional no estudo do comportamento alimentar de animais consiste no agrupamento destes episódios (ou visitas) em unidades ainda mais robustas, comumente denominadas *refeições*, que se mostram unidades comportamentais interessantes para um entendimento mais amplo das condições motivacionais relativos ao comportamento ingestivo (ZORRILLA et al., 2005).

Portanto, os critérios usados para o agrupamento de eventos ingestivos em episódios e de episódios em refeições são pontos críticos em trabalhos nesta área.

Alguns estudos propuseram discutir métodos para definição destas unidades comportamentais. Variadas são as formas de execução desta tarefa, sendo a maioria delas baseadas na definição de um critério de separação entre dois padrões distintos, ou seja, definição de pontos-critério fixos (PC). Por exemplo, a forma atualmente empregada nos trabalhos em nosso laboratório é o critério de separação de três segundos, isto é, eventos ingestivos sequenciais que ocorram em um espaço de tempo menor que três segundos são agrupados em episódio ingestivos. Este critério é empírico e não traz em si, necessariamente, justificativa biológica ou estatística.

Uma técnica mais tradicional para definir objetivamente este critério é baseada no traceamento das curvas de sobrevivência log-transformadas (*log-survivorship curves*) dos intervalos entre eventos ou episódios (CLIFTON, 1982; METZ, 1975; SLATER, 1974). Este método consiste em traçar o gráfico da frequência acumulada dos intervalos (exemplo, intervalos entre bicadas), em escala logarítmica, contra a duração em tempo em escala linear. Em processos onde os intervalos entre eventos gerados são caracterizados por duas naturezas distintas, uma de longa e outra de curta duração, a curva de sobrevivência log-transformada é côncava, com um decaimento rápido no início e lento no final (SLATER; LESTER, 1982). Os principais problemas no uso de curvas de frequência acumulada são a dependência entre os pontos (isto é, um mesmo intervalo pode influenciar vários pontos na curva) e a suposição que os eventos acontecem aleatoriamente no tempo, o que não é coerente com o comportamento alimentar animal (os eventos não são aleatórios, mas dependentes, de alguma forma, do tempo sem comer). É discutido por (TOLKAMP et al., 1998) que este método é provável de provocar erros na classificação de quantidade significativa de intervalos.

Outra abordagem é dada por (SIBLY; NOTT; FLETCHER, 1990), trabalhando com dados ingestivos de Mandarim (*Taeniopygia guttata*) e ratos (*Rattus norvegicus*), e (BERDOY, 1993), com dados de ratos (*Rattus norvegicus*), onde são analisados os gráficos de frequência de ocorrência log-transformada dos intervalos (*log-frequency curves*). Esta metodologia supera a desvantagem das técnicas baseadas em curvas de sobrevivência, pois os pontos numa curva de frequência de ocorrência (ou histogramas) são independentes. Entretanto, como discutido por (TOLKAMP et al., 1998), as formas de escolha da largura de classes nos histogramas altera diretamente o formato destes, podendo causar variações consideráveis nos critérios de separação calculados. Apesar desta desvantagem e guardadas as limitações do método, o

mesmo se mostrou interessante para investigar o agrupamento, em pombos, de episódios ingestivos em diferentes estados motivacionais (TAUFFER; SPUDEIT; MARINO-NETO, 2012).

As metodologias baseadas em análise de curvas *log-survivorship* e *log-frequency* modelam a sequência comportamental como sendo resultante de processos aleatórios, onde a probabilidade de ocorrência de um evento independe do tempo decorrido desde o último evento. Esta suposição entra em conflito com o processo biológico relacionado à saciedade, que inibe a atividade alimentar logo após a ingestão e diminui de intensidade com o passar do tempo sem comer (TOLKAMP et al., 1998; ZORRILLA et al., 2005). Esta interpretação incoerente decorre da disposição dos dados nestes formatos (*log-survivor* e *log-frequency*), que gera gráficos visualmente muito similares a composições de exponenciais negativas. Porém, uma investigação mais cautelosa das frequências de ocorrência dos intervalos curtos mostra que, na verdade, a curva começa com baixos valores de frequência e cresce subitamente, decaindo logo em seguida. Esta morfologia enviesada se assemelha à curva de distribuição log-normal.

Reparando nesta configuração em dados ingestivos de vacas Holstein-Friesian (*Bos primigenius*), e buscando uma modelagem matemática com parâmetros mais coerentes biologicamente, (TOLKAMP et al., 1998) propõe então que os intervalos entre eventos sejam log-transformados, tendo-se desta forma uma distribuição aproximadamente Gaussiana (LIMPET; STAHEL; ABBT, 2001), ou uma soma de gaussianas. Este método, denominado log-normal, possui várias vantagens, primeiramente por trazer um significado biológico mais plausível aos parâmetros dos modelos ajustados, ou seja, a apresentação da distribuição dos dados é coerente com os conceitos de saciedade. Para o cálculo dos parâmetros, são usados métodos numéricos de estimativa por máxima verossimilhança (*maximum-likelihood estimation*, MLE), métodos estes mais robustos que o ajuste por regressão não linear, pois independem da escolha da largura de classes no histograma. Ao definir-se o número de componentes gaussianas e os parâmetros das mesmas, os pontos-critério podem ser encontrados nos cruzamentos entre as componentes (ponto-critério: valor de tempo entre eventos usado para separar intervalos inter-episódios de intervalos entre episódios, (TOLKAMP et al., 1998)). Também, (HOWIE et al., 2009) propõe formas de estimar os pontos-critério onde uma ou mais componentes da função de distribuição não podem ser devidamente estimadas. Esta metodologia foi bem aplicada e discutida em trabalhos com diferentes animais (HOWIE et al., 2010),

mostrando-se muito interessante para tratar problemas de segmentação de contínuos comportamentais.

Uma desvantagem dos métodos que se utilizam de pontos-critério fixos (PC) para diferenciação entre padrões comportamentais reside no fato destes considerarem apenas a probabilidade instantânea (no sentido amostral) de uma observação pertencer a dada classificação. Por sua vez, as estruturas conhecidas como Cadeias de Markov trazem o conceito de probabilidade de transição entre estados; em uma cadeia de ordem N a probabilidade de mudança para o próximo estado está condicionada aos últimos N estados ocorridos. Os MOM utilizam-se da estrutura de uma cadeia markoviana de primeira ordem associada a um processo estocástico observável, considerando desta forma o efeito da situação atual na chance de ocorrência futura.

Esta abordagem, em relação aos modelos baseados em definição de pontos-critério, pode trazer vantagem interessante em situações com grupos de observações separáveis (*e.g.*, tempos entre bicadas curtos e longos) onde a interpretação do processo subjacente (*e.g.*, episódios ingestivos) é intimamente relacionada com a sequência temporal de ocorrência destas observações e, ao mesmo tempo, algumas observações caem em regiões de muita mistura entre duas curvas, onde as probabilidades de pertencer a um ou outro grupo são muito similares.

Historicamente, as técnicas de reconhecimento de padrões baseadas na teoria de cadeias markovianas são usadas, e com sucesso, em problemas de reconhecimento automático de fala (RABINER, 1989) e é justamente esta área que possui maior quantidade de material produzido sobre o tema. Porém, é uma teoria aplicável a qualquer processo estocástico, tornando possível também seu uso em outras áreas como reconhecimento de imagens (AAS; EIKVIL; HUSEBY, 1999) e de padrões comportamentais de animais (ALLCROFT et al., 2004; ELDAR; MORRIS; NIV, 2011; SCHLIEHE-DIECKES; KAPPELER; LANGROCK, 2012).

A possibilidade de tratar, dentro de um formalismo matemático, segmentação e classificação de dados, constitui uma característica muito atraente do uso dos MOM para reconhecimento de padrões (FINK, 2007). Além de possuir teoria matemática sedimentada como base para o processamento e agrupamento dos dados, uma das contribuições mais importantes da abordagem oferecida pelos modelos ocultos de Markov é a possibilidade da associação biológica às componentes internas do modelo. Isto é, os parâmetros matemáticos podem ser relacionados diretamente com as características do comportamento em estudo.

A estrutura dos MOM pressupõe um processo estocástico subjacente (os estados ocultos) que por sua vez geram saídas também estocásticas (sinal observável). Estes estados ocultos podem representar unidades comportamentais (por exemplo, episódios ingestivos) a serem identificadas através da análise estatística de suas emissões (por exemplo, intervalos entre bicadas).

Portanto, o interesse no uso de modelos Markovianos para classificação dos EI pode ser justificado por propriedades significativas: teoria matemática e métodos numéricos já consagrados na literatura, capacidade de organização temporal das unidades comportamentais e possibilidade de associação direta de padrões comportamentais aos parâmetros do modelo.

O estudo da motivação e definição de estruturas motivacionais é de fundamental importância para a neurociência, uma vez que são conceitos mais amplos que meros fragmentos comportamentais e, portanto, melhores para explicar como os sistemas cerebrais mediam os processos psicológicos que guiam o comportamento observado (BERRIDGE, 2004). O agrupamento dos episódios ingestivos e consequente segmentação da motivação alimentar em refeições e intervalos entre refeições é o procedimento padrão na pesquisa em animais (TOLKAMP et al., 1998; ZORRILLA et al., 2005) e as vantagens do método são claras, uma vez que é uma abordagem relativamente bem estabelecida na literatura e a comparação entre diferentes estudos é razoavelmente direta. Entretanto, esta classificação é um tanto abrupta e pode não detectar características dinâmicas mais sutis relativas ao processo em estudo.

A segmentação e quantização dos processos de natureza contínua, como é o caso da motivação alimentar animal, trazem perda de informação ao negligenciarem, em certo grau, as estruturas de transição contínuas. Esta é uma desvantagem da quantização de variáveis e a divisão da estrutura motivacional em apenas dois estados contribui para erros desta natureza ao associar a processos biológicos contínuos as noções de ligado-desligado, 100%-0%, tudo ou nada.

Por outro lado, em animais com livre acesso ao alimento, a saciedade aparenta progressão gradual representada pela progressiva mudança de comportamentos voltados ao alimento para, primeiramente, comportamentos de exploração ou auto-limpeza e, em seguida, para comportamentos de sono ou descanso (RODGERS; HOLCH; TALLETT, 2010). Esta gradativa mudança na ocorrência de comportamentos voltados ao alimento pode, portanto, ser usada para

caracterização de alterações também gradativas na motivação do animal (KOOLHAAS; DE BOER; BOHUS, 1997).

Usando a capacidade dos MOM de representação das dependências probabilísticas de transição entre estados e associando as distribuições dos elementos comportamentais observados (episódios ingestivos e intervalos entre episódios) a estes estados, pode-se buscar por unidades representativas da motivação alimentar com etapas de transição mais suaves e que ainda mantenham significado biológico relevante.

Portanto, neste trabalho, foram propostas abordagens utilizando os modelos ocultos de Markov para duas etapas de agrupamento de dados: identificação de episódios ingestivos a partir de intervalos entre bicadas e identificação de diferentes estados motivacionais a partir dos intervalos entre episódios e duração destes episódios.

1.3 OBJETIVOS

O trabalho tem por objetivo principal investigar a aplicação dos Modelos Ocultos de Markov (MOM) na problemática da compreensão do comportamento alimentar de pombos.

Objetivos específicos:

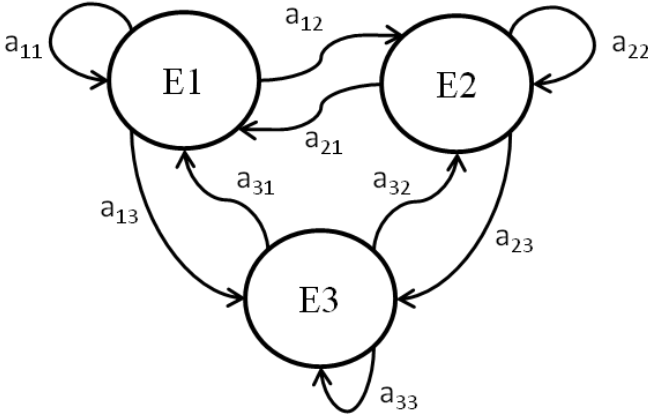
- Projetar e implementar um sistema de sensoriamento de força sob os comedouros dos animais associado a um sistema para registro automático e exibição em tempo real dos sinais provenientes dos mesmos;
- Processar os sinais obtidos: filtragem de ruído, separação de componentes DC e AC, identificação dos momentos de ocorrência de eventos ingestivos (bicadas) e caracterização do perfil de consumo;
- Aplicar a teoria dos MOM às séries de intervalos entre bicadas (IEB) para identificação de episódios ingestivos (EI) e comparar com os resultados obtidos a partir do método padrão de classificação por ponto-crítério fixo (PC);
- Classificar, por meio de MOM, as seqüências de EI e IEE em unidades mais robustas, os estados motivacionais. Investigar a relevância destas unidades para a descrição da motivação alimentar dos animais.

2. MODELOS OCULTOS DE MARKOV

2.1 TEORIA E DEFINIÇÕES

Cadeias de Markov são estruturas matemáticas compostas por estados com probabilidades de transição entre si a cada instante de tempo (Figura 1). Estas probabilidades são condicionadas apenas pelo estado atual em que o processo se encontra e não dos acontecimentos passados, isto é, é um processo sem memória. A esta característica dá-se o nome de *propriedade Markoviana*.

Figura 1 - Estrutura de uma cadeia de Markov com três estados: E1, E2 e E3, onde a_{ij} é a probabilidade de transição, a cada instante de tempo, do estado i para o estado j .



Em uma cadeia de Markov composta por N estados definidos, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, com probabilidades de ocorrência inicial $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$ e onde a cada instante de tempo ocorre uma transição entre estados com probabilidade a_{ij} , denotam-se os instantes de tempo como $t = 1, 2, \dots, T$ e o estado a cada instante t como q_t . Desta forma tem-se:

$$\pi_i = P[q_1 = s_i], \quad 1 \leq i \leq N$$

$$a_{ij} = P[q_t = s_j | q_{t-1} = s_i], \quad 1 \leq i, j \leq N$$

$$A = \{a_{ij}\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}$$

As seguintes restrições devem ser observadas:

$$\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$$

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} = 1, \quad 1 \leq i \leq N$$

$$a_{ij} \geq 0$$

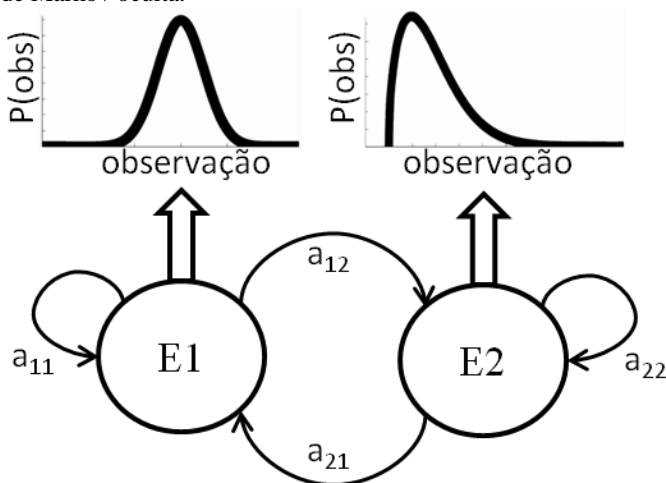
Os Modelos Ocultos de Markov (MOM) são processos duplamente estocásticos onde uma cadeia de Markov que permanece oculta (não observável) com probabilidades discretas de transição entre estados influencia um segundo processo, este observável, que pode ser governado por probabilidades discretas ou contínuas. Em situações onde as chances de emissão advindas de determinado estado são governadas por funções contínuas, tem-se os chamados Modelos Ocultos de Markov com densidade de observações contínua, Figura 2.

Dada uma sequência de observações emitidas $O = o_1, o_2, \dots, o_T$, para cada estado i a probabilidade b_i de se observar determinado elemento é dada uma função densidade de probabilidade (FDP) associada, com conjunto de parâmetros Π_i , onde:

$$b_i(O) = FDP(O, \Pi_i)$$

Modelos ocultos de Markov com FDP contínuas são as estruturas utilizadas neste trabalho e serão referidas por apenas MOM.

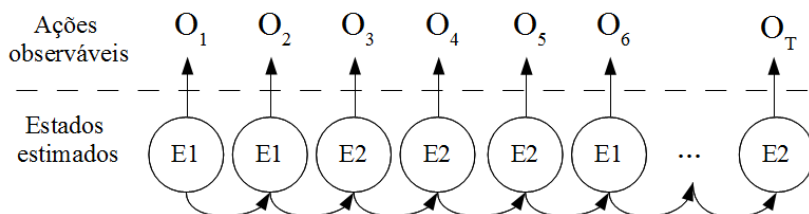
Figura 2 - Estrutura de um MOM com dois estados e densidade de observações contínua. Os valores observados são gerados por estados pertencentes a uma cadeia de Markov oculta.



Esta estrutura de MOM permite modelar sequências temporais de observações que possuam processos geradores subjacentes relevantes, porém não diretamente identificáveis, como ilustrado na Figura 3. Por exemplo, os episódios ingestivos são unidades comportamentais não mensuráveis diretamente, porém produzem ações observáveis, como a sequência de bicadas de um pombo em um comedouro (ou intervalos entre estas bicadas), e podem, portanto, ser identificadas indiretamente por meio dos MOM. De forma similar, os EI e IEE podem ser entendidos como emissões observáveis relacionadas a diferentes níveis de motivação alimentar de um animal (*e.g.*, níveis de interesse pela ração) que não podem ser medidas diretamente.

Figura 3 - Estados estimados a partir de uma sequência de observações.

T = número de observações.



Um Modelo Oculto de Markov é, portanto, caracterizado por um conjunto de parâmetros $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$. Se as funções de probabilidade de emissão associadas a cada estado forem compostas por curvas Gaussianas ou soma de Gaussianas, a notação geral do modelo será:

T = número de observações;
 N = número de estados do modelo;
 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ distintos estados da cadeia Markoviana;
 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ sequência de observações;
 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ sequência de estados;
 A = matriz de probabilidade de transição entre estados, quadrada de ordem N ;
 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$ probabilidade inicial de cada Estado;
 μ_i = média ou vetor de médias associada à i -ésima distribuição;
 σ_i = desvio padrão ou vetor de desvios padrão associado à i -ésima distribuição;
 $b_i(o_t)$ = probabilidade da observação o_t ser emitida pelo i -ésimo estado;
 $i = 1, \dots, N$;
 $t = 1, \dots, T$;

2.2 TRÊS PROBLEMAS BÁSICOS

Dado uma estrutura de MOM com as características descritas, três problemas fundamentais devem ser solucionados. Os desenvolvimentos a seguir são baseados no trabalho de (RABINER, 1989), onde pode ser encontrada discussão mais detalhada dos métodos.

Problema 1 - Dados os parâmetros do modelo $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$ e uma sequência de observações $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$, de que forma computar $P(O|\lambda)$, a probabilidade de ocorrência da sequência O dado o modelo λ ?

Problema 2 - Dados os parâmetros do modelo $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$ e uma sequência de observações $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$, como escolher a sequência ótima de estados ocultos $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ que melhor represente a sequência de observações?

Problema 3 - Como ajustar os parâmetros do modelo $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$ de forma a maximizar $P(O|\lambda)$?

2.2.1 Problema 1

O problema 1 trata da avaliação dos parâmetros do modelo com base na sequência de observações. O cálculo de verossimilhança é feito com a primeira etapa do *algoritmo de avanço-retrocesso* (do inglês *forward-backward*), onde é definida a variável de avanço $\alpha_t(i)$

$$\alpha_t(i) = P(o_1 o_2 \dots o_t, q_t = S_i | \lambda)$$

isto é, a probabilidade da sequência parcial de observações $\{o_1 o_2 \dots o_t\}$ (do início até o instante t) e estado S_i no instante t dado o modelo λ . A solução para $\alpha_t(i)$ é dada em três etapas:

1 – Inicialização:

$$\alpha_1(i) = \pi_i b_i(o_1)$$

2 – Indução:

$$\alpha_{t+1}(j) = \left[\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} \right] b_j(o_{t+1})$$

3 – Finalização:

$$P(O | \lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_T(i)$$

com $1 \leq i, j \leq N$, e $1 \leq t \leq T - 1$. Portanto, a finalização da etapa de avanço resolve o problema 1. Para a etapa de retrocesso é definida a variável de retrocesso $\beta_t(i)$

$$\beta_t(i) = P(o_{t+1} o_{t+2} \dots o_T | q_t = S_i, \lambda)$$

isto é, a probabilidade da sequência parcial de observações $o_{t+1} o_{t+2} \dots o_T$ (do instante $t+1$ até o final) dado o estado S_i no instante t e o modelo λ . A solução para $\beta_t(i)$ é dada da seguinte forma:

1 – Inicialização:

$$\beta_T(i) = 1$$

2 – Indução:

$$\beta_t(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)$$

com $1 \leq i \leq N$, e $t = T - 1, T - 2, \dots, 1$. As variáveis de retrocesso serão usados posteriormente para resolução do problema 3.

2.2.2 Problema 2

Para a solução do problema 2, é usado o *algoritmo de Viterbi*. Este algoritmo busca o melhor (máxima verossimilhança) caminho único de estados $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ para dada sequência de observações $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$. Para isto é definido

$$\delta_t(i) = \max_{q_1, q_2, \dots, q_{t-1}} P[q_1 q_2 \dots q_t = S_i, o_1 o_2 \dots o_t \mid \lambda]$$

isto é, dado modelo λ , a maior probabilidade de um caminho único de estados levando ao estado S_i no instante t , que represente a sequência parcial de observações $o_1 o_2 \dots o_t$. Por indução tem-se:

$$\delta_{t+1}(j) = \max_i [\delta_t(i) a_{ij}] b_j(o_{t+1})$$

Para recuperar a sequência de estados, os argumentos que maximizam a expressão anterior para cada t e j devem ser guardados. Estes argumentos são armazenados no vetor $\psi_t(j)$. O cálculo da melhor sequência de estados é feito, então, da seguinte forma:

1 – Inicialização:

$$\delta_1(i) = \pi_i b_i(o_1)$$

$$\psi_1(i) = 0$$

com $2 \leq t \leq T$ e $1 \leq j \leq N$.

2 – Recursão:

$$\delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] b_j(o_t)$$

$$\psi_t(j) = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} \delta_{t-1}(i) a_{ij}$$

com $2 \leq t \leq T$ e $1 \leq j \leq N$.

3 – Finalização:

$$P^* = \max_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i)$$

$$q_T^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i)$$

4 – Reconstrução do caminho de estados:

$$q_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*)$$

com $t = T - 1, T - 2, \dots, 1$. Tem-se então, no vetor $Q^* = \{q_1^*, q_2^*, \dots, q_T^*\}$, a sequência de estados mais provável de ter gerado dada sequência de observações.

2.2.3 Problema 3

Para resolver o problema de ajustar os parâmetros do modelo $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$ de forma a maximizar $P(O|\lambda)$, é usado o algoritmo de *Baum-Welch*. Primeiramente define-se $\xi_t(i, j)$, a probabilidade de estar no estado S_i no instante t e no estado S_j no instante $t+1$, dados o modelo λ e a sequência de observações $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$,

$$\xi_t(i, j) = P(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j \mid O, \lambda)$$

que pode ser descrita em termos das variáveis de avanço e retrocesso da seguinte forma:

$$\xi_t(i, j) = \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{P(O|\lambda)}$$

Fazendo-se o somatório de $\xi_t(i, j)$ sobre o índice $1 \leq j \leq N$, tem-se:

$$\gamma_t(i) = \sum_{j=1}^N \xi_t(i, j) = \frac{\alpha_t(i)\beta_t(i)}{P(O|\lambda)}$$

onde $\gamma_t(i)$ é a probabilidade de estar no estado S_i no instante t , dados o modelo λ e a sequência de observações $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$. Logo, fazendo-se o somatório de $\gamma_t(i)$ ao longo do tempo, tem-se uma estimativa da quantidade de vezes de ocorrência do estado S_i . De forma similar, com o somatório de $\xi_t(i, j)$ ao longo do tempo tem-se uma estimativa do número de transições do estado S_i para o estado S_j . Portanto:

$$\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i) = \text{Número esperado de transições a partir de } S_i$$

$$\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j) = \text{Número esperado de transições de } S_i \text{ para } S_j$$

Com estas fórmulas é então possível reestimar os parâmetros do modelo da seguinte forma:

$$\bar{\pi}_i - \text{Probabilidade de } S_i \text{ em } (t = 1) = \gamma_1(i)$$

$$\bar{a}_{ij} - \frac{\text{Número esperado de transições de } S_i \text{ para } S_j}{\text{Número esperado de transições a partir de } S_i} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i)}$$

Também são definidas por (RABINER, 1989) as equações para reestimação dos parâmetros da função densidade de probabilidade de emissão, quando esta é uma mistura de gaussianas. Neste trabalho, porém, as FDP são previamente identificadas e então consideradas imutáveis durante o aprendizado dos outros parâmetros do MOM.

2.3 MOM APLICADOS AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO ANIMAL

De uma forma geral, os MOM são estruturas usadas para o agrupamento sequencial de dados em classes pré-estabelecidas. Apesar da larga utilização em reconhecimento de voz, os MOM podem ser aplicados em qualquer área de conhecimento onde o objetivo seja modelagem e análise de dados sequenciais (FINK, 2007), como é o caso do estudo comportamental de animais.

A utilização de modelos matemáticos baseados em cadeias Markovianas tem se mostrado relevante principalmente em estudos ecológicos (LANGROCK et al., 2012), podendo estar associados a dados de distintas naturezas (temperatura, velocidade, posição, etc...) e com aplicação a várias espécies. Este ferramental já foi utilizado, por exemplo, para predição de locais de caça de lobos (*Canis lupus*) (FRANKE et al., 2006), classificação das etapas de migração de atuns (*Thunnus maccoyii*) (PATTERSON et al., 2009), de padrões de mergulho do vison-americano (*Neovison vison*) (BAGNIEWSKA et al., 2013), do comportamento alimentar de lêmures (*Microcebus murinus*) (SCHLIEHE-DIECKS; KAPPELER; LANGROCK, 2012), de padrões comportamentais de bobo-pequeno (*Puffinus puffinus*) (DEAN et al., 2013) e de comportamento social de focas (*Halichoerus grypus*) (LIDGARD et al., 2012).

Entretanto, estas metodologias também encontram aplicação na classificação comportamental de animais em experimentação em laboratório como, por exemplo, na identificação do movimento de abelhas (*Apis mellifera*) (FELDMAN; BALCH, 2003), de padrões de comportamento materno em camundongos (*Mus musculus*) (CAROLA; MIRABEAU; GROSS, 2011) e classificação comportamental de camundongos (SILVA; GONÇALVES, 2007) e de serpentes (*Crotalus Durissus*, *Bothrops Neuwiedi* e *Boa Constrictor*) (GONÇALVES et al., 2007).

Investigando a influência da motivação na frequência de respostas condicionadas de ratos (*Rattus norvegicus*), ELDAR et al. (2011) foram capazes de encontrar distintos padrões motivacionais usando MOM com FDP contínuas. Para obter acesso a uma solução de sacarose, os animais foram treinados a pressionar uma alavanca e os intervalos entre as ativações desta alavanca foram tratados como observações emitidas de estados ocultos relacionados à motivação do animal.

Em pombos, se forem tomados como dados observados (emissões do modelo) os intervalos entre eventos ingestivos, ou seja, intervalos de tempo entre as bicadas dos animais no comedouro, os estados ocultos do modelo podem ser entendidos como episódios ingestivos, ou visitas do animal ao comedouro. Neste caso, as classes pré-estabelecidas são duas, episódios ingestivos (EI) ou intervalos entre episódios (IEE).

Percebe-se, visualmente, que estes EI não acontecem aleatoriamente, mas em grupos concentrados em determinados intervalos de tempo e possuem diferentes durações. A estrutura dos MOM com FDP contínuas é capaz de considerar essas características de duração dos EI e IEE em um contexto sequencial e, portanto, é uma metodologia atraente para classificação de estados motivacionais do animal a partir do comportamento observado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ANIMAIS E EXPERIMENTOS

Os procedimentos experimentais realizados foram previamente aprovados pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal de Santa Catarina sob o protocolo 23080.0383262/2008-65. Foram usados ao todo quinze pombos (*Columba livia*, adultos, machos e fêmeas, peso corporal 380-476 g), mantidos em gaiolas-casa padrão (41 x 44 x 49 cm) com ração regular para aves e água *ad libitum*. O ambiente obedece ao ciclo claro/escuro de 12/12h, sendo o período claro das 7:00 às 19:00. Após um prazo de dez dias para adaptação ao ambiente os animais foram submetidos a quatro manipulações alimentares, com espaço mínimo de quatro dias entre dois experimentos, durante as quais os sinais provenientes dos medidores de força foram registrados por todo o tempo:

1) Controle com ração regular ou CR: Os animais continuaram com livre acesso a ração regular para aves e água pelo período da tarde (13:00 às 18:00). Nos intervalos de 12:00-13:00 e 18:00-19:00 o pesquisador retirava momentaneamente o acesso ao alimento e recolhia do piso a quantidade de ração desperdiçada para pesagem.

2) Controle com ração palatável, ou CP: Os animais tiveram livre acesso a ração palatável, composta por mistura de grãos e painço e aveia, e água pelo período de uma tarde (13:00 às 18:00). As intervenções do pesquisador no ambiente foram exatamente as mesmas descritas em CR.

3) Jejum de vinte e quatro horas com apresentação de ração regular, ou JR: os animais permaneceram sem acesso a qualquer alimento, mas com livre acesso à água, das 13:00 do dia anterior ao experimento às 13:00 do dia do experimento. O pesquisador entrou no ambiente às 13:00 para dispor os comedouros e o animal passou a ter livre acesso a ração regular pelo período de uma tarde (13:00 às 18:00). Das 18:00 às 19:00 o pesquisador entrou no ambiente para retirar do piso a quantidade de ração desperdiçada.

4) Jejum de vinte e quatro horas com apresentação de ração palatável, ou JP: Exatamente o mesmo desenho experimental da situação JR, porém com apresentação de ração palatável (aveia e painço) no lugar da ração regular.

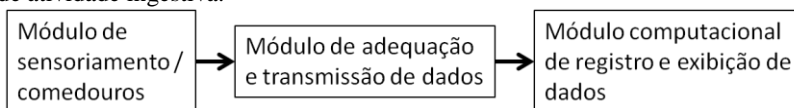
Estes experimentos foram desenhados de forma a provocar diferentes estímulos alimentares nos animais e, desta forma, verificar se a abordagem proposta seria capaz de distinguir os efeitos

comportamentais provocados por estímulos metabólicos (homeostáticos) e hedônicos. Para o registro dos experimentos foi desenvolvido um sistema instrumentado capaz de medir as ações ingestivas dos animais quando estas ocorressem.

3.2 SISTEMA DE REGISTRO DE ATIVIDADE INGESTIVA: TRANSDUTORES

O sistema de registro de atividade ingestiva consiste em três módulos principais: módulo de sensoriamento de força, módulo de adequação, digitalização e transmissão dos sinais e módulo computacional de registro e exibição dos dados em tempo real, Figura 4.

Figura 4 - Diagrama esquemático das etapas do sistema de aquisição e registro de atividade ingestiva.

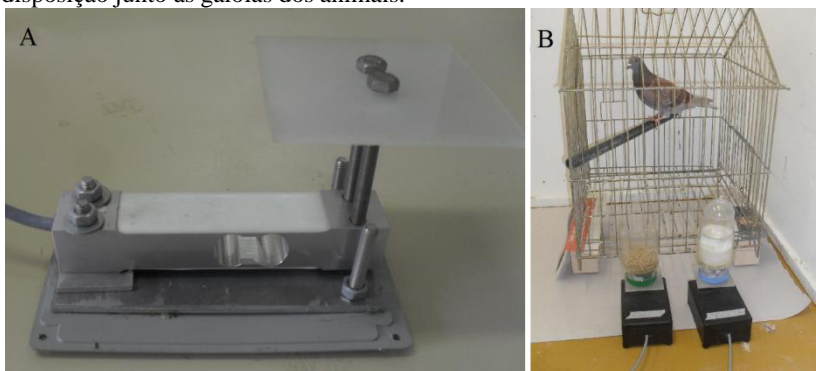


Foi montado, sob os alimentadores, um sistema de sensoriamento de força capaz de medir não somente os pesos de ração e água, mas também a ocorrência dos eventos ingestivos dos animais. O sistema de medição de força é baseado em células de carga (modelo PW6D, HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, Alemanha) de ponto único, possuem capacidade máxima de 3000 g com erro acumulado máximo de ± 0.14 g (para a faixa de medição usada no trabalho) e frequência natural de 270 Hz (permite amostragem de até 67 Hz). A folha de dados completa do transdutor encontra-se no APÊNDICE A. As características dos transdutores estão de acordo com as recomendações da Organização Internacional de Metrologia Legal para células de carga (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY, 2000).

Foi montada uma estrutura em alumínio para sustentação e fixação das células de carga, Figura 5-A, e adaptadas carcaças plásticas para proteção. Junto à extremidade do sensor foi fixada uma plataforma de apoio para o pote alimentador. Vasilhames plásticos foram adaptados para servir como potes alimentadores contando com mecanismo de encaixe firme e de fácil retirada para limpeza. Os comedouros foram dispostos externamente à gaiola, Figura 5-B, permitindo acesso dos

animais à ração/água enquanto evitam outras formas de interação não alimentar (*e.g.*, que o animal bata com o corpo ou defeque sobre o alimentador) que consistiriam em erros de medição. Ao fundo das carcaças plásticas foram adaptados apoios emborrachados para diminuição da interferência de possíveis vibrações na superfície de apoio.

Figura 5 - A - Transdutor fixado à estrutura de alumínio e plataforma de apoio, sem a carcaça plástica de proteção. B - Montagem transdutor/comedouro com disposição junto às gaiolas dos animais.



As células de carga são alimentadas com 10 V e possuem tensão de saída de 2 mV/V para carga nominal, isto é, se alimentadas com 10 V e submetidas à cargas variando de 0-3000 g terão tensão de saída variando de 0-20 mV DC.

Ainda que os alimentadores tenham sido moldados de forma a diminuir o desperdício, as ações dirigidas ao alimento dos pombos causam inevitavelmente espalhamento de grãos de ração para fora do alimentador. Para evitar que os animais voltem a atenção para grãos espalhados pelo chão (e, portanto, realizem atividade ingestiva fora do alcance do sensor) as gaiolas foram mantidas a alturas de aproximadamente 15 cm do chão, de forma que os animais não tinham acesso a nenhum grão fora do alimentador.

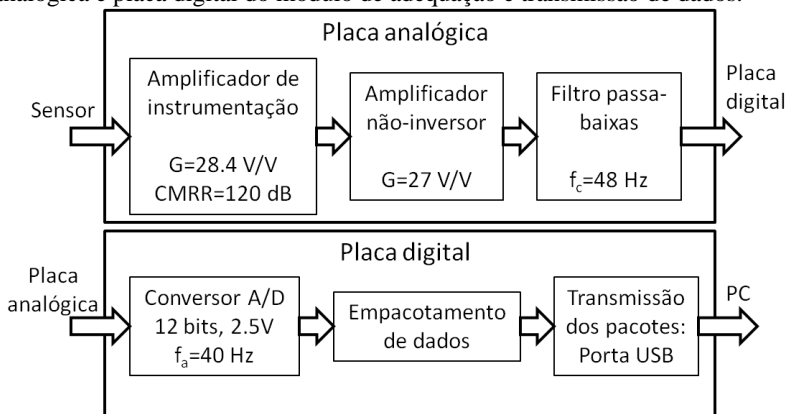
3.3 SISTEMA DE REGISTRO DE ATIVIDADE INGESTIVA: HARDWARE

As células de carga se conectam ao segundo módulo, este consistindo de duas etapas: etapa de tratamento de sinal analógico e etapa de digitalização e transmissão dos dados, Figura 6.

Na placa analógica o sinal é primeiramente amplificado em 28.4 V/V por um amplificador de instrumentação (AD620, Analog Devices) com rejeição de modo comum de aproximadamente 120 dB. Em seguida passa por uma segunda etapa de amplificação em 27 V/V, totalizando o valor de ganho aproximado de 768 V/V. O sinal ainda passa por um filtro passa-baixas com frequência de corte em 48 Hz para filtragem de possível interferência da rede elétrica.

Como exemplo, uma variação de 1 g no peso sobre o comedouro provoca uma variação de 6,67 μV na saída do transdutor e de, aproximadamente, 5,12 mV após a etapa de amplificação.

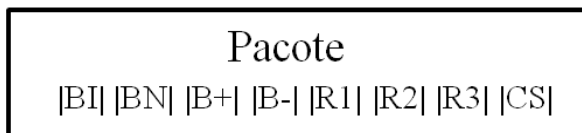
Figura 6 - Diagrama esquemático da etapa de pré-tratamento do sinal: placa analógica e placa digital do módulo de adequação e transmissão de dados.



O sinal amplificado e filtrado é então amostrado a uma taxa de 40 Hz para cada canal (cada transdutor). Os sinais analógicos passam por um conversor A/D 12 bits ($2^{12} = 4096$ intervalos ou passos de quantização) com limite superior de 2.5 V, o que equivale a uma variação de aproximadamente 488 g no comedouro. Este é um limite de peso confortável para os experimentos com pombos, uma vez que as ingestões diárias de ração e água destes animais usualmente se mantêm na ordem de cinco vezes menor que este valor.

A placa responsável pela conversão analógica/digital e transmissão é microcontrolada (ADUC7026, Analog Devices). Os dados digitalizados são empacotados de acordo com o protocolo ilustrado pela Figura 7, onde BI é o *byte* de início de pacote, BN é o byte endereçador do transdutor, B+ e B- são os *bytes* mais e menos significativos contendo o valor da medição de peso, R1, R2 e R3 são *bytes* reservados para uso futuro e CS é o *byte* de *checksum* para checagem de erros.

Figura 7 - Protocolo de montagem de pacotes para transmissão digital dos dados.



O dispositivo de comunicação associado à placa digital (UM232R, Future Technology Devices International Limited) transmite os pacotes de dados através de porta USB ao sistema computacional responsável pelo registro e exibição dos dados.

3.4 SISTEMA DE REGISTRO DE ATIVIDADE INGESTIVA: SOFTWARE

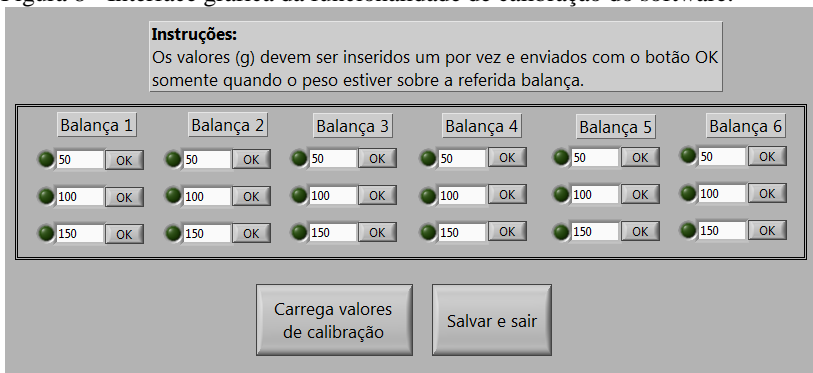
O software para registro, visualização e controle dos dados do experimento foi desenvolvido em plataforma LabVIEW (versão 8.2, National Instruments). Esta plataforma de desenvolvimento é interessante porque a programação é feita em diagramas de blocos, o que permite uma compreensão visual rápida do algoritmo, possibilitando que futuros trabalhos o entendam e alterem com certa facilidade se necessário, além de gerar automaticamente a interface com o usuário, facilitando a criação de ferramentas intuitivas.

Além disso, o dispositivo de transmissão de dados da placa digital se comunica diretamente com aplicativos desenvolvidos em LabVIEW por meio dos drivers disponibilizados na página virtual do fabricante (www.ftdichip.com).

O programa possui duas funcionalidades: Calibração e Registro. No modo Calibração (Figura 8), são calculados os coeficientes da reta de calibração de cada balança por vez, isto é, os parâmetros que relacionam o peso real sobre o sensor com os valores de passo de quantização do conversor A/D. Mais detalhes desta etapa podem ser

encontrados no ANEXO A - Manual do usuário. Pode-se salvar os valores de calibração ou abrir um arquivo com os valores previamente calculados. O programa lança mão destes valores para a transformação de unidades de passo do conversor A/D para gramas.

Figura 8 - Interface gráfica da funcionalidade de calibração do software.

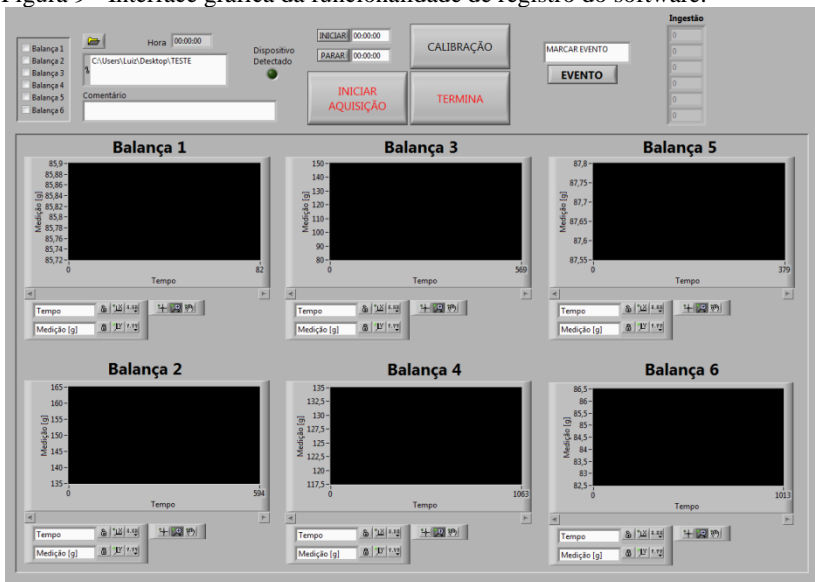


No modo Registro (Figura 9) o software se conecta ao módulo transmissor para leitura contínua dos dados. Os valores medidos em cada transdutor, ao serem lidos pelo programa, são exibidos em tela em tempo real e registrados em arquivo. A interface tem a proposta de ser intuitiva e direta. São exibidas as opções de escolha do diretório onde os arquivos de dados serão guardados, comentários do pesquisador para o cabeçalho dos arquivos, sinal luminoso de indicação de detecção do dispositivo, botões de início e término manuais da aquisição, possibilidade de início e término automáticos do registro com campo de horários desejados, campo para marcação de eventos ao decorrer do experimento e indicativo grosseiro da quantidade de alimento e água ingeridos no atual instante (não é capaz de identificar quanto foi desperdiçado).

São exibidos seis gráficos, atualizados a cada 250 ms, com os valores de peso medidos em cada balança. Estes gráficos são facilmente manipuláveis com ampliação, afastamento e livre movimentação para visualização de valores passados. Os dados são salvos em arquivos *.csv* (valores separados por vírgula) e também em arquivos *.lvm*, extensão própria do software *Labview* que torna mais fácil o tratamento dos dados pelo programa. Os arquivos com extensão *.lvm* possuem a vantagem de serem facilmente convertidos em arquivos de texto simples (valores

separados por tabulação), facilitando muito o tratamento dos mesmos por meio de softwares como *Matlab* ou *GNU Octave*.

Figura 9 - Interface gráfica da funcionalidade de registro do software.



4 TRATAMENTO DOS DADOS

4.1 DADOS PRIMÁRIOS - ANÁLISE E AGRUPAMENTO

Com os sinais provenientes os sensores de força é possível identificar, ao longo de um experimento, os exatos momentos de ocorrência dos eventos ingestivos dos pombos (bicadas). Foi identificado ruído branco presente no circuito que, somado a eventuais vibrações indesejadas dos comedouros provocam picos ruidosos de até 0,6 g na componente AC. Para evitar que este ruído seja interpretado como uma bicada, foram marcados como eventos ingestivos apenas picos no sinal com magnitude maior ou igual a 0,8 g. Porém, a unidade fundamental para o algoritmo de agrupamento não são as bicadas em si, mas sim os intervalos entre bicadas, ou IEB como serão chamados ao longo do texto. Portanto, ao longo de um experimento, são identificados todos os IEB que separam cada par sequencial de bicadas mais fortes que 0.8 g. Toda análise de dados foi feita em Matlab (Release 2011a, MathWorks).

A Figura 10-A mostra, para um indivíduo em situação CR e para todos os animais do grupo CR, no intervalo de uma tarde, as frequências de ocorrência dos IEB. À primeira vista estas curvas se assemelham a distribuições exponenciais negativas, porém, como observado por (TOLKAMP et al., 1998), isto é uma má impressão causada pela disposição do histograma e valores de IEB muito curtos (muito próximos à zero) inexistem ou ocorrem com baixa frequência, o que pode ser confirmado com uma inspeção minuciosa desta parte, Figura 10-B. A não ocorrência de intervalos entre bicadas menores que 200 ms pode ser explicada por motivo mecânico, é o tempo mínimo que o animal demora para realizar dois movimentos seguidos (HÖRSTER et al., 2002; ZEIGLER; LEVITT; LEVINE, 1980). Este formato enviesado da curva de distribuição sugere a aplicação da transformação logarítmica pode ser uma maneira de normalizar a variância dos dados, tornando coerente o uso de modelos compostos por curvas Gaussianas (LIMPERT; STAHEL; ABBT, 2001; TOLKAMP et al., 1998).

O algoritmo de classificação exige que seja previamente decidida a estrutura do MOM, isto é, deve-se escolher o número de estados e a função densidade de probabilidade de emissão para cada estado. Percebe-se que, após a transformação logarítmica dos intervalos, o formato da distribuição assemelha-se a uma mistura de curvas Gaussianas, Figura 10-C. Visualizando este gráfico, fica clara a ocorrência de, relativamente, muitos intervalos de curta duração e

poucos intervalos de longa duração. Isto se dá pela curta duração dos experimentos (5 horas) e, nas distribuições individuais de IEBs, torna a estimativa de parâmetros para a distribuição de intervalos longos (parte direita do gráfico) muitas vezes inviável.

Para contornar esta limitação, os dados individuais (IEB log-transformados) referentes à ração são agrupados por condição experimental, isto é, são estimados os parâmetros das distribuições associadas por grupo: CR, JR, CP e JP. Os dados referentes à água de todos os animais são agrupados independentemente da situação experimental.

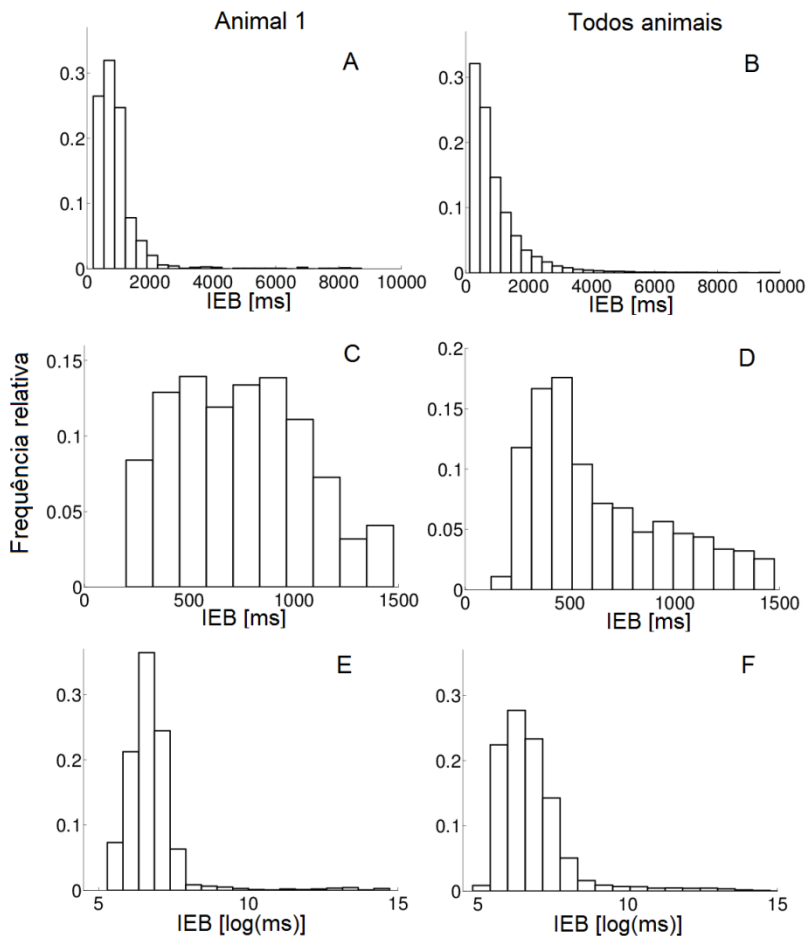
Buscou-se então o modelo de soma de gaussianas que melhor se adequasse às distribuições de dados. Para este fim foi usado o software *CLUSTER* (BOUMAN, 1997) que estima por máxima verossimilhança os valores dos parâmetros ao mesmo tempo em que busca pelo número de componentes que ofereça melhor custo-benefício usando o critério de Comprimento de Descrição Mínimo (MDL - Minimum Description Length).

Com a modelagem da distribuição de IEB por mistura de Gaussianas, estratégias de agrupamento de dados como os propostos por (HOWIE et al., 2009) já seriam capazes de identificar sequências de EI e IEE. Porém, como discutido previamente, esta abordagem não considera os efeitos da progressão temporal do comportamento, classificando cada observação (IEB) com base apenas na probabilidade de ser emitida por cada estado no instante atual. Porém, quando se observam as componentes Gaussianas separadas, percebe-se que há regiões de união entre os dois conjuntos nos quais as probabilidades de pertencer a um ou outro grupo são muito próximas e, portanto, o conhecimento da situação anterior à atual pode influenciar significativamente na decisão de atribuir a observação atual a determinado estado.

O sinal resultante da ingestão de água possui características distintas da ingestão de ração uma vez que não consiste em bicadas para buscar um grão, mas em mergulhar o bico e sugar o líquido. Esta ação produz, em primeiro instante, variação positiva de peso resultante da imersão do bico e, posteriormente, ocorrência aleatória de picos devido à força de sucção do animal e ao movimento variável da água. A ocorrência destes picos pode ser explorada de forma similar à ocorrência de bicadas voltadas à ração uma vez que só ocorrem em situações de ingestão de água, ou seja, estes picos podem ser marcados e os intervalos entre estes usados pelo algoritmo de agrupamento para reconhecimento de EI de água. Deve ser notado, porém, que esta identificação de eventos referentes à ação de beber é apenas um artifício

matemático para o agrupamento de dados e não traz o mesmo significado biológico que uma bicada voltada à razão.

Figura 10 - Frequência relativa de ocorrência dos IEB no grupo CR para A- um animal, B- todos os animais, C- um animal com vista ampliada nos intervalos curtos, D- todos os animais com vista ampliada nos intervalos curtos, E- um animal com os valores de IEB log-transformados e F- todos os animais com os valores de IEB log-transformados.



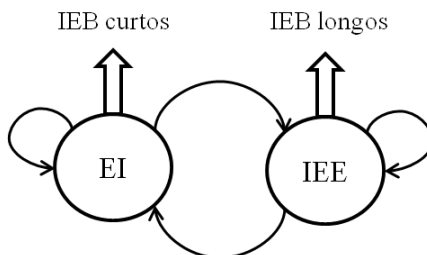
4.2 DEFINIÇÃO DE EPISÓDIOS POR MOM

Os modelos ocultos de Markov (MOM) são representações gráficas de processos estocásticos onde se tem um processo latente (estados ocultos) gerador de sinais observáveis (emissões). Supondo que variações na motivação alimentar dos animais afetem o perfil de ações direcionadas ao alimento e água, com medições quantitativas destas ações (intervalos entre bicadas) pode-se estimar, por meio dos algoritmos de *Baum-Welch* e *Viterbi*, os parâmetros de modelo individuais e a sequência de estados ocultos com máxima verossimilhança em relação à sequência de ações observada. Pode-se entender este agrupamento de intervalos entre eventos ingestivos como episódios ingestivos (EI) ou visitas ao comedouro, separados por intervalos entre episódios (IEE).

Um MOM é completamente descrito pelo conjunto de parâmetros $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$, onde A é a matriz de probabilidades de transição entre estados, FDP é a função densidade de probabilidade de emissões de cada estado e π é o vetor de probabilidade de ocorrência inicial de cada estado. Neste trabalho, os parâmetros A e π são individuais para cada sequência registrada, enquanto as FDP são estimadas para cada grupo experimental. Por exemplo, para o grupo CR, o animal 1 irá gerar um MOM com parâmetros A e π únicos (relacionados à sequência de ações ingestivas deste animal) e se utilizará das FDP estimadas para o grupo inteiro (ajustadas com os dados dos 15 animais em situação CR). As FDP relacionadas à água são comuns entre todos os grupos.

Percebe-se que os IEB log-transformados acontecem principalmente de duas formas: intervalos de curta duração com frequência de ocorrência alta e intervalos de longa duração com frequência de ocorrência baixa, Figura 10-C. Desta forma, o MOM foi definido com dois estados: estado 1 (EI) com FDP associada à soma de gaussianas ajustada ao lado esquerdo da curva de distribuição (emissão de intervalos curtos, ou momentos onde ocorrem muitas bicadas em curto espaço de tempo) e estado 2 (IEE) com FDP associada à soma de gaussianas ajustada ao lado direito da curva de distribuição (emissão de intervalos longos, ou momentos onde bicadas são eventos raros), Figura 11.

Figura 11 - Estrutura do modelo oculto de Markov com dois estados usado para agrupamento das sequências de IEB em episódio ingestivo ou intervalo entre episódios.



Com as funções de probabilidade de emissão de cada Estado previamente definidas, cada sequência individual é processada pelo algoritmo de Baum-Welch que trabalhará no aprendizado das matrizes de transição de estados e probabilidades iniciais. Em seguida o algoritmo de Viterbi define a sequência de estados com maior probabilidade de ocorrência, isto é, o algoritmo de Viterbi é efetivamente a etapa de identificação em EI ou IEE.

Os EI podem ocorrer de duas formas, EI com variação de peso sentida pelo sistema, ou EI sem variação de peso. Supõe-se que o aparecimento deste segundo grupo decorre principalmente de dois fatores: limitação de sensibilidade do sistema de 0,2 g (variações menores que isto são tratadas como erro) e comportamento de exploração de recursos pelo animal.

O desperdício de ração (quantidade de grãos que são jogados para fora do alimentador) é um problema que ocorre inevitavelmente, em menor ou maior escala, mesmo com os alimentadores montados e dispostos de forma a minimizar isto. A ração desperdiçada foi pesada ao fim de cada experimento e compensada na quantidade consumida por EI por proporção direta, isto é, EI responsáveis por variações maiores de peso tem descontos de desperdício proporcionalmente maiores.

Não foi observado comportamento de exploração de recursos com a água, isto é, todas as investidas ao bebedouro resultaram na ingestão de água. Também não foi observado desperdício (*e.g.*, derramamento de água no chão), portanto não foi necessário compensar os valores de ingestão de água a cada episódio.

Uma vez feito o agrupamento dos IEB em EI ou IEE, foram tomadas as seguintes medidas de interesse: quantidade de EI ocorridos, duração dos EI e duração dos IEE.

Investigou-se o efeito, nestas medidas de interesse, de duas variáveis categóricas independentes: período de jejum (estímulo motivacional metabólico) e tipo de ração (estímulo motivacional hedônico). Para entender como estas variáveis alteram o comportamento alimentar em termos de episódios, testes ANOVA de duas vias (desenho 2x2) foram feitos e, quando houve interação entre fatores, foi feito o teste *post hoc* de Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*).

Os efeitos de diferentes manipulações alimentares, em alguns casos, conseguem apenas ser percebidos em curto prazo e se diluem ao decorrer de tempos mais longos. Para investigar como isto ocorre, os grupos foram comparados considerando-se as duas primeiras horas de registro, as duas horas seguintes e o resultado acumulado no tempo integral de registro de 5 horas. Os resultados obtidos com o método proposto foram comparados aos resultados obtidos com o método tradicional (ponto critério fixo) por meio de testes t pareados.

4.3 DEFINIÇÃO DE ESTADOS MOTIVACIONAIS POR MOM

A primeira etapa de classificação se propôs a identificar episódios ingestivos (EI), ou visitas dos animais aos comedouros de água e ração. Como discutido por (ZORRILLA et al., 2005), o consumo de água está intimamente relacionado ao consumo de ração, sendo, portanto relevante para a compreensão do comportamento alimentar. Levando isto em consideração, as sequências individuais de EI de ração e água foram combinados (somados), dando origem a novas sequências individuais de EI e IEE.

O método usual de agrupamento destas visitas busca pelo maior IEE que possa ser mesclado aos EI anterior e posterior, produzindo desta forma a unidade de refeição. Neste caso o procedimento é similar ao feito para definição do ponto critério fixo: a distribuição de frequência de ocorrência dos IEE é modelada por uma soma de curvas Gaussianas, que por sua vez é dividida em dois grupos, intervalos inter-refeições e intervalos entre refeições. Entretanto, para uma melhor caracterização da motivação animal (mais do que apenas 2 estados), não apenas os IEE são relevantes, mas também as durações dos EI (tempo que o animal se dedica a uma visita). Portanto, cada estado do MOM foi associado a uma FDP de emissão de EI e uma FDP de emissão de IEE.

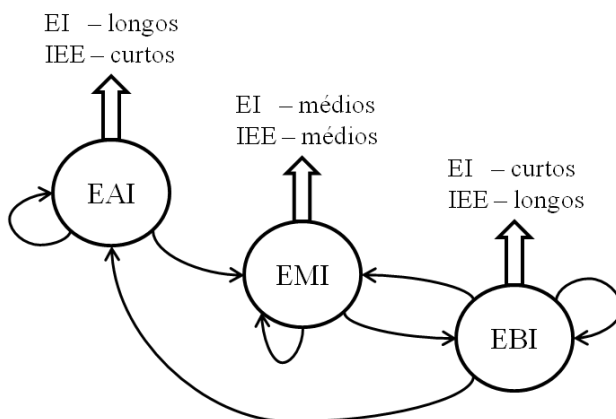
Os MOM foram estruturados em três estados: estado de alto interesse (EAI), estado de médio interesse (EMI) e estado de baixo interesse (EBI) pela ração e/ou água, Figura 12. Ao EAI não é permitido

transitar diretamente para o EBI, tendo que passar obrigatoriamente pelo EMI; ao EMI não é permitido transitar diretamente para o EAI, tendo que passar obrigatoriamente pelo EBI e ao EBI é permitido transitar diretamente a qualquer estado. A todos os estados é permitida transição para si mesmo. Desta forma, tentou-se mimetizar as mudanças sequenciais graduais no interesse pela ração/água.

As distribuições dos EI e IEE (log-transformados) para cada grupo experimental foram modelados por misturas de Gaussianas consistentes de três componentes e cada componente foi associada a um estado do MOM. O EAI foi associado a emissões de longos EI e curtos IEE; o EMI foi associado a EI e IEE de média duração e o EBI foi associado a curtos EI e longos IEE.

Para examinar a relevância desta metodologia de segmentação, testes ANOVA de duas vias foram feitos para o tempo relativo despendido em cada estado e consumo relativo de ração e água em cada estado. Estes testes tiveram por finalidade investigar como as manipulações alimentares poderiam alterar o papel desempenhado por cada estado motivacional.

Figura 12 - Estrutura do MOM para agrupamento das sequências de EI e IEE em estados motivacionais.



5 RESULTADOS

5.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO E REGISTRO

Os transdutores, componentes eletrônicos da placa analógica, conversor A/D e fonte de alimentação adicionam, inevitavelmente, erros à medição por imprecisão, e estes erros são acumulados no decorrer do caminho do sinal. Para estimar o nível de imprecisão total de medição, após a etapa de calibração, sobre cada transdutor foram colocados pesos de 50, 100 e 150 g e o sinal final de medição foi registrado durante 60 segundos.

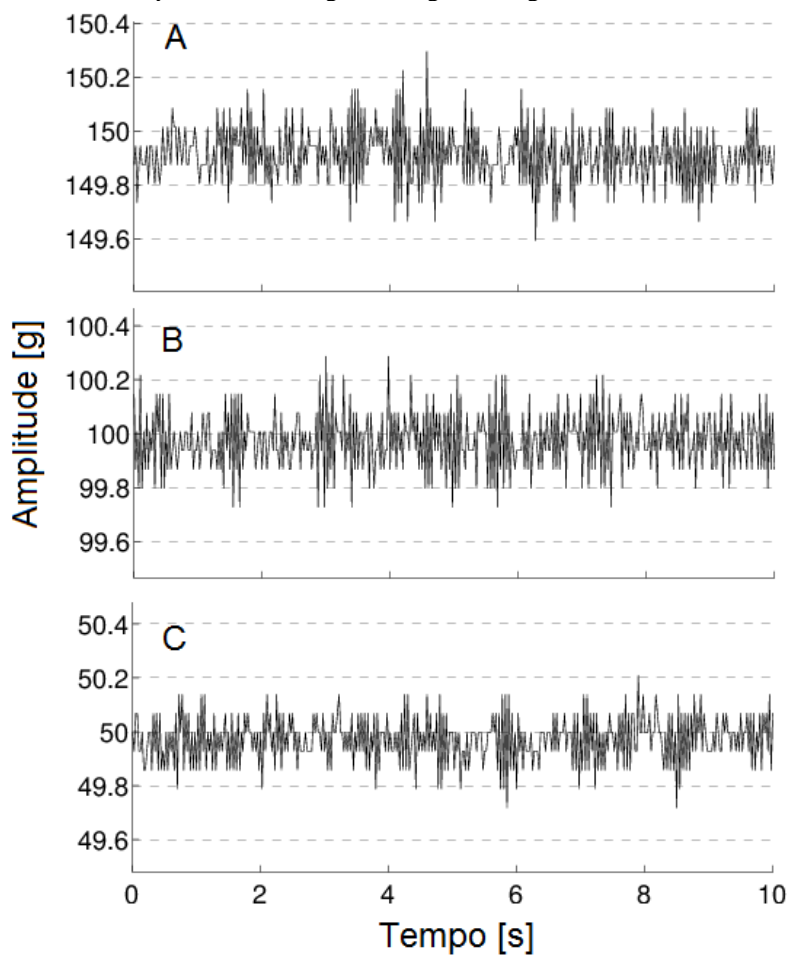
Em relação ao valor de referência (valor de peso constante sobre o transdutor), a imprecisão de medição pode ser descrita em termos de dois parâmetros: deslocamento do valor médio do sinal registrado em relação ao valor referência ($\Delta\mu$), que representa um erro de calibração, e valor quadrático médio do sinal (rms), que representa a variação esperada em torno da média devido ao ruído. A Tabela 1 resume os resultados obtidos para cada transdutor. A Figura 13 exibe os sinais de medição para um único transdutor em um intervalo de 10 segundos para melhor visualização.

Tabela 1 - Valores RMS da incerteza final de medição e desvio médio do valor referência para cada transdutor. Valores de medida em grama.

Transdutor	50 g		100 g		150 g	
	\pm rms	$\Delta\mu$	\pm rms	$\Delta\mu$	\pm rms	$\Delta\mu$
T1	0.11	-0.17	0.13	-0.18	0.17	-0.17
T2	0.09	-0.02	0.11	-0.03	0.12	-0.09
T3	0.14	-0.17	0.27	-0.14	0.14	-0.08
T4	0.12	-0.18	0.17	-0.13	0.11	-0.10
T5	0.12	-0.22	0.12	-0.11	0.13	+0.09
T6	0.10	-0.03	0.12	-0.09	0.18	-0.18

Para testar a confiabilidade na transmissão dos pacotes de dados, deixou-se, em três oportunidades, o sistema funcionando continuamente durante 24 horas. A média de perda de pacotes foi de 0.5%.

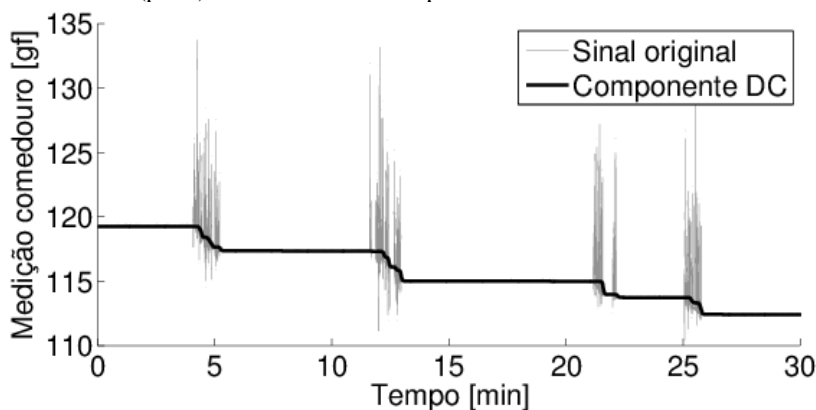
Figura 13 - Resultado da medição durante 10 segundos, para o mesmo transdutor, dos pesos de A- 150 g, B- 100 g e C- 50 g.



5.2 EVENTOS INGESTIVOS E PERFIL ALIMENTAR

A Figura 14 mostra, para um animal em condição CR, aproximadamente uma hora de registro do sinal de peso proveniente do alimentador com ração. Percebe-se uma concentração alta de ações ingestivas em determinados momentos, com longos intervalos de separação. A linha de base é estimada filtrando-se o sinal original com um filtro passa-baixas *butterworth* de 1º ordem com $f_c=0,1$ Hz e a variação desta linha equivale à quantidade de ração retirada do recipiente.

Figura 14 - Sinal original proveniente de alimentador com ração (cinza) com linha de base (preto) em um intervalo de aproximadamente 30 minutos.



A Figura 15-A mostra o sinal original de um comedouro com ração em uma escala de tempo adequada para identificação visual das ações ingestivas. Com um filtro passa-altas *butterworth* de 1º ordem com $f_c=0.1$ Hz são retiradas as componentes de baixa frequência e os momentos de ocorrência dos eventos, marcados por círculos escuros na Figura 15-B, são então identificados pelo algoritmo. De forma similar, a Figura 16-A mostra o sinal original proveniente de um comedouro com água em escala que tornam visíveis as variações características da ação de beber. Com um filtro passa-altas *butterworth* de 1º ordem com $f_c=0.1$ Hz são retiradas as componentes de baixa frequência e os picos de sinal, marcados por círculos escuros na Figura 16-B, são identificados pelo algoritmo.

Figura 15 - A - Perfil característico do sinal proveniente do comedouro com ração. B - Identificação dos eventos ingestivos a partir da componente AC do sinal original.

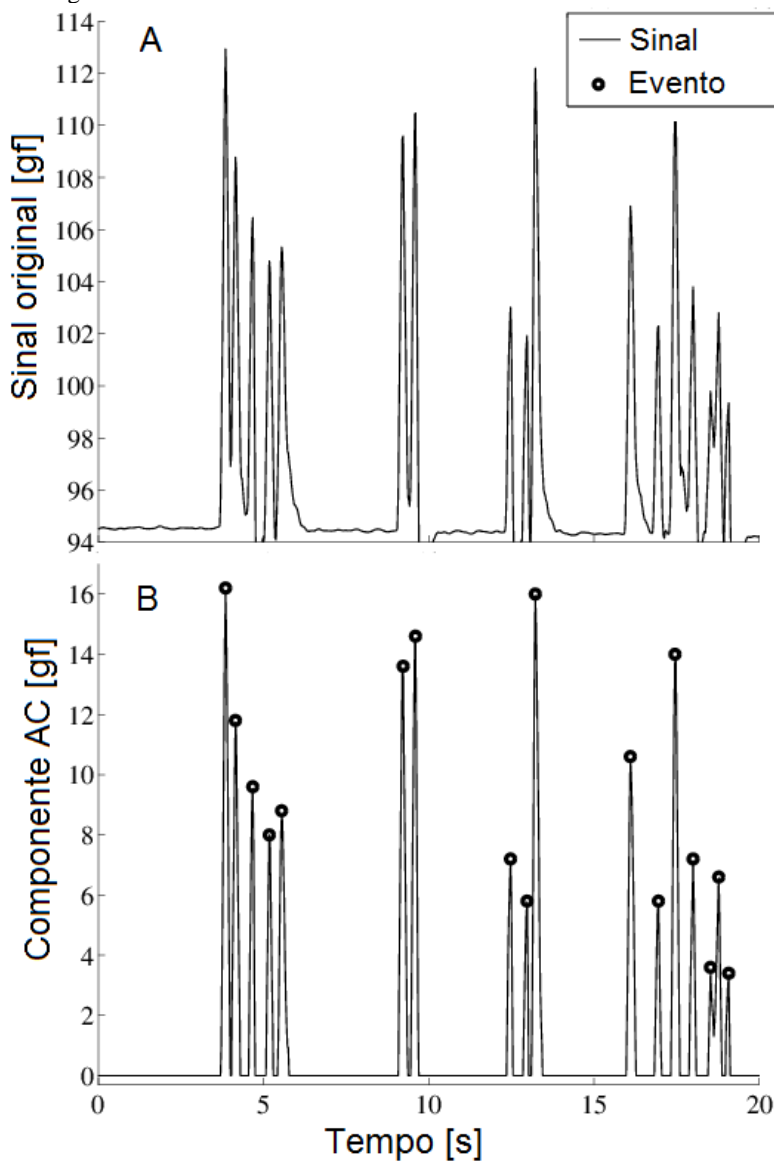
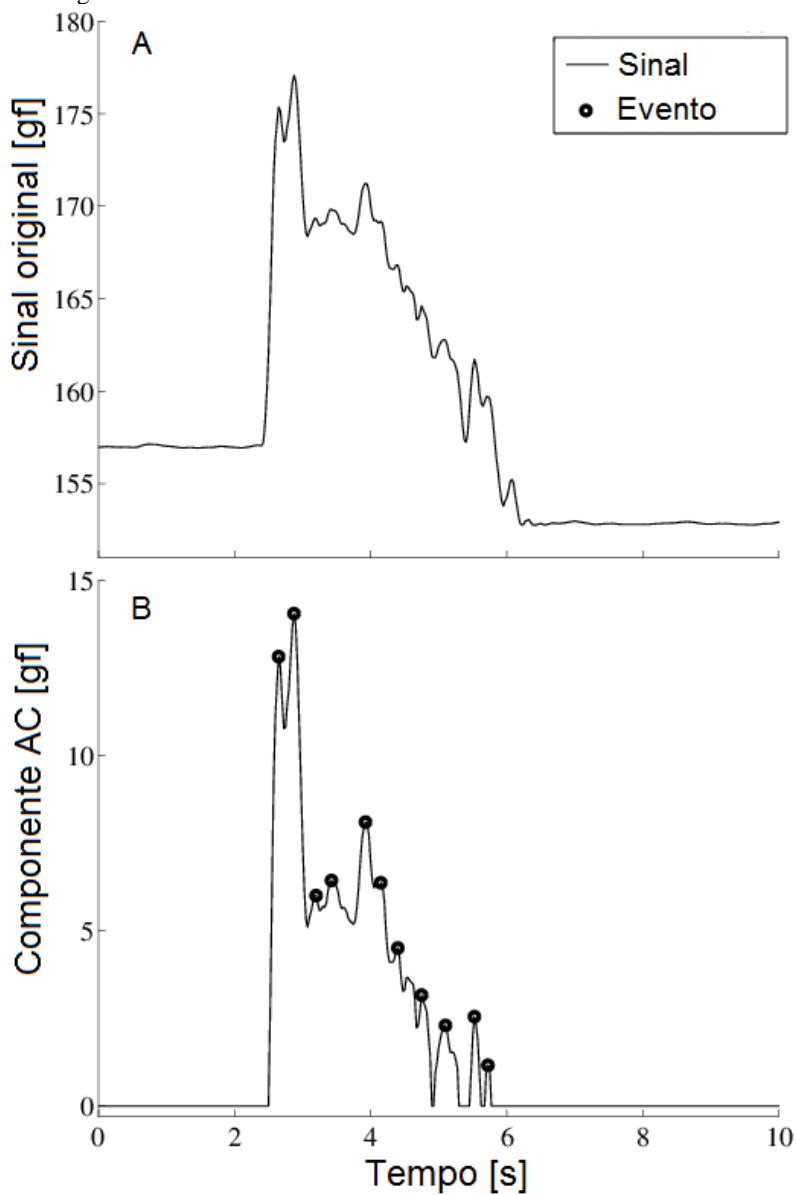


Figura 16 - A - Perfil característico do sinal proveniente do comedouro com água. B - Identificação dos eventos ingestivos a partir da componente AC do sinal original.



Para todas as manipulações alimentares foram registrados os sinais provenientes dos alimentadores por cinco horas, durante os quais não só os eventos ingestivos foram identificados como também a variação da linha de base do peso foi acompanhada. A Figura 17 exhibe os perfis de número médio de bicadas (17-A) e consumo médio por hora de ração (17-B) e água (17-C) característicos em cada condição experimental.

O consumo de ração se apresenta praticamente constante na condição CR por todo o período. Percebe-se aumento no consumo durante a primeira hora no grupo JR com um regime visualmente constante nas horas seguintes. Para os grupos CP e JP, há um visível aumento no consumo médio de ração durante a primeira hora de experimento, enquanto no restante da tarde a ingestão se apresenta menor e aparentemente linear. As condições que envolvem período de jejum apresentam alto consumo de água durante a primeira hora. O consumo de água também parece aumentar nas duas últimas horas.

A Tabela 2 resume os resultados obtidos pela ANOVA de duas vias. Em relação ao número de eventos, não houve interação entre fatores e a ração palatável aumentou significativamente em 184% o número de bicadas nas duas primeiras horas e em 100% para o período de 5 horas, não havendo diferença entre grupos no intervalo de 3-4 h. O período em jejum não provocou nenhuma alteração em relação ao número de eventos.

No consumo de ração não houve interação entre fatores e tanto a ração palatável quanto o período de jejum provocaram aumento significativo do consumo nas duas primeiras horas (80% e 21%) e diminuição do consumo no intervalo de 3-4 h (60% e 30%). Para o período inteiro de 5 horas observou-se aumento de ingestão de ração provocado pela ração palatável e pelo tempo em jejum (26% e 9% marginalmente significante).

Quanto ao consumo de água, houve interação estatisticamente significante entre fatores para as duas primeiras horas. O período em jejum provocou aumento tanto para animais com acesso a ração palatável (90%) quanto para animais com acesso à ração regular (110%). Para animais em jejum, a ração palatável diminui o consumo de água (38%), não provocando alteração em animais sem jejum.

Para o intervalo de 3-4 h a ração palatável provocou diminuição na ingestão de água (42%) e o período de jejum não causou nenhum efeito. No resultado acumulado durante as 5 horas, a ração palatável diminuiu (38%) e o período de jejum aumentou (34%) a ingestão de água.

Figura 17 - A- Número médio de bicadas por hora, B- consumo médio de ração por 100g de peso corporal por hora e C- consumo médio de água por 100g de peso corporal por hora.

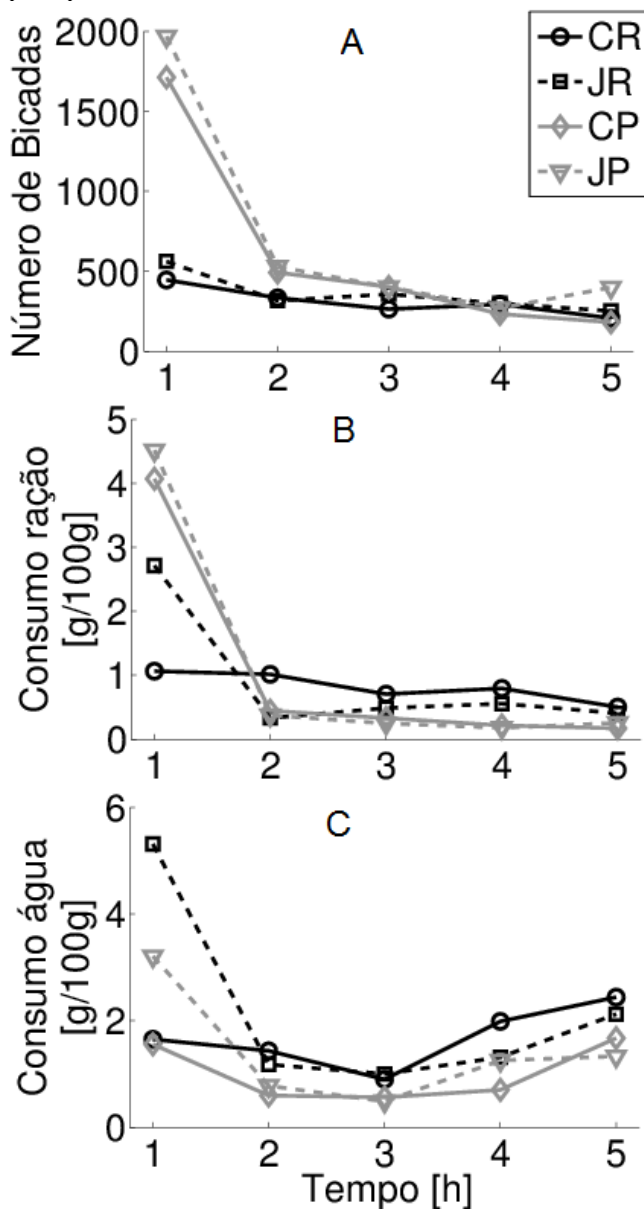


Tabela 2 - Resultados dos testes ANOVA duas vias. Os asteriscos marcam valores estatisticamente significantes (ao nível de 95% e marginalmente significantes).

Variável dependente	Fator	1-2h (valor p)	3-4h (valor p)	1-5h (valor p)
Consumo ração	Ração	*0.00	*0.00	*0.00
	Jejum	*0.01	*0.00	*0.07
	Interação	0.2	0.1	0.8
Consumo água	Ração	*0.00	*0.00	*0.00
	Jejum	*0.00	0.9	*0.00
	Interação	*0.01	0.1	0.6
Bicadas	Ração	*0.00	0.7	*0.00
	Jejum	0.3	0.6	0.2
	Interação	0.6	0.8	0.6

Em resumo, os dois estímulos provocaram aumento na ingestão de ração durante as duas primeiras horas seguido de diminuição nas duas horas seguintes. Isto sugere que há um período de quiescência da ingestão de alimento logo após uma ingestão aumentada, independente da causa desta. Portanto, os valores acumulados nas 5 horas de experimento falham em representar este período intermediário.

O estímulo hedônico provocou aumento no número de bicadas, enquanto que o estímulo metabólico não causou alteração nesta medida. O tempo em jejum provocou aumento na ingestão de água nas duas primeiras horas.

5.3 AJUSTE DE CURVAS À DISTRIBUIÇÃO DOS INTERVALOS ENTRE BICADAS (IEB)

Os IEB referentes à ração foram agrupados por situação experimental e então modelados por misturas de curvas Gaussianas. Para o grupo CR, o software *CLUSTER* encontrou o modelo com melhor custo/benefício consistindo da soma de seis curvas. A soma das quatro primeiras curvas foi classificada como representação da probabilidade de emissão quando no estado 1, episódio ingestivo (EI), e a soma das duas últimas curvas como representação da probabilidade de emissão

quando no estado 2, intervalos entre episódios (IEE). O grupo CR foi tomado como referência e, para as distribuições de IEB dos outros três grupos, foram estimados parâmetros para modelos consistentes de seis componentes e as associações entre estados do MOM e curvas componentes feitas da mesma forma.

Com o modelo estruturado desta maneira, percebe-se que os pontos de intersecção entre os dois distintos estados “andam para a esquerda” quando há aumento na motivação à ingestão de alimento. Quando em condição experimental CR, Figura 18, o ponto de intersecção (transformado para segundos) ocorre em 5 segundos, isto é, se os padrões forem classificados por ponto-critério, IEB menores que 5 segundos são classificados como EI e IEB maiores que 5 segundos como IEE. De forma similar, para as situações JR, CP e JP os pontos de intersecção ocorrem em, respectivamente, 4.4, 3.1 e 2.9 segundos. Isso demonstra que, se adotados pontos-critério fixos, a condição experimental deve ser levada em consideração.

Os pontos de cruzamento entre a quinta e a sexta curvas gaussianas ocorreram em 92, 14, 16 e 12 segundos para, respectivamente, CR, JR, CP e JP. Estes valores de tempo são, muitas vezes, suficientes para outras ações não voltadas ao alimento (*e.g.*, beber água ou explorar) que seriam incondizentes com a classificação de episódio ingestivo de ração, orientando assim a escolha de separação de grupos de curvas gaussianas.

Os eventos ingestivos voltados à água (ocorrência de picos no sinal) ocorrem aleatoriamente devido à movimentação caótica da água durante a ação de beber do animal, portanto é razoável assumir que estas ocorrências não sofram alterações provocadas pelos estímulos alimentares. Todos os IEB referentes à água foram agrupados independentemente da situação experimental, formando um único grupo, a partir do qual foi encontrado o modelo com melhor custo/benefício consistindo de seis componentes, Figura 19. Os pontos de cruzamento entre quarta e quinta curvas e entre quinta e sexta curvas ocorreram, respectivamente, em 8.5 e 83 segundos, orientando a associação entre curvas e estados do MOM de forma similar à ração, com as quatro primeiras curvas associadas ao estado EI e as duas últimas curvas associadas ao estado IEE.

Percebe-se, nas Figuras 18-B e 19-B, que os pontos de separação entre grupos, ou pontos-critério para classificação, ocorrem em regiões de muita mistura entre as componentes adjacentes e IEB que ocorram em torno desta região possuem probabilidade similar de pertencer tanto a EI quanto a IEE.

Figura 18 - A- Ajuste de gaussianas à distribuição de IEB voltados à razão na condição CR, com as seis componentes representadas individualmente em linhas cinza tracejadas e o modelo (resultado da soma de componentes) representado em linha contínua preta. O círculo marca o ponto de intersecção entre as curvas representativas de dois diferentes estados, que ocorre em 8.51 $\log(\text{ms})$, equivalente a 5 s. B- Ampliação visual nas duas curvas representando os intervalos longos.

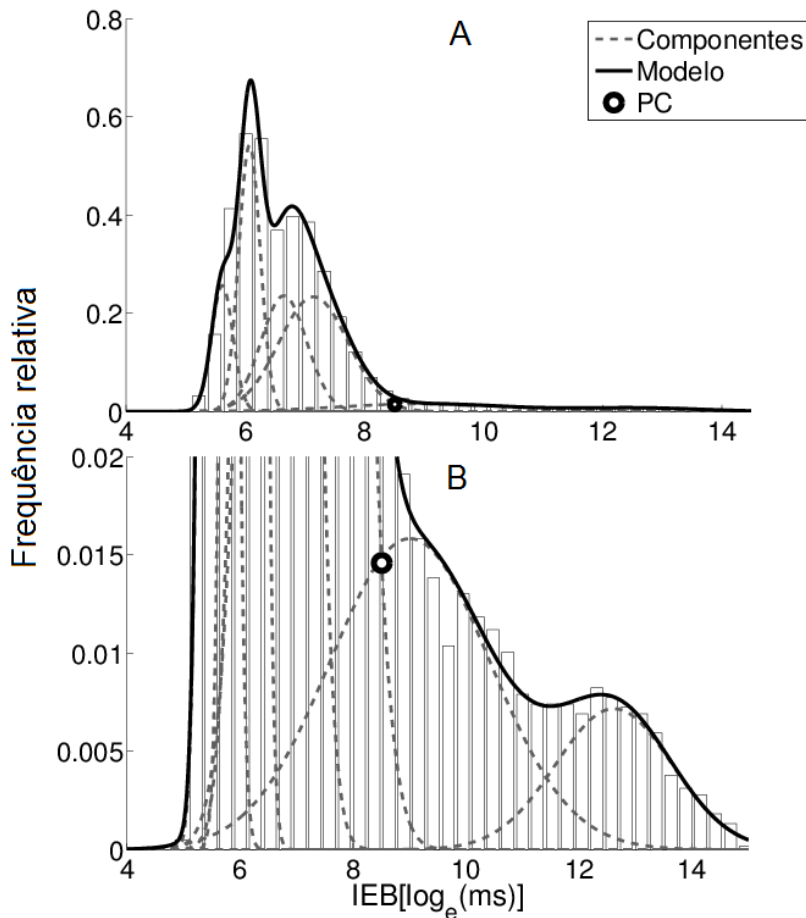
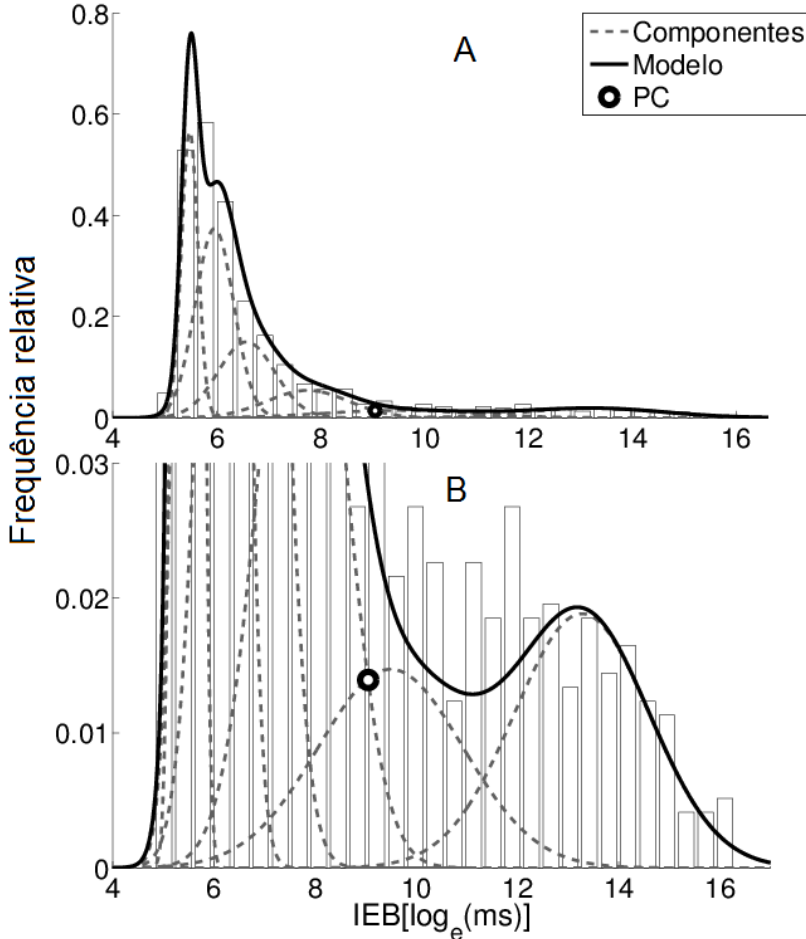


Figura 19 - A- Ajuste de gaussianas à distribuição de IEB voltados à água, com as seis componentes representadas individualmente em linhas cinza tracejadas e o modelo (resultado da soma de componentes) representado em linha contínua preta. O círculo marca o ponto de intersecção entre as curvas representativas de dois diferentes estados, que ocorre em 9.05 log(ms), equivalente a 8.5 s. B- Ampliação visual nas duas curvas representando os intervalos longos.



Em resumo, para cada grupo experimental, as frequências de ocorrência dos IEB voltados à ração (log-transformados) de todos os animais foram usadas para ajuste dos parâmetros de modelos de mistura de seis componentes Gaussianas, com as quatro primeiras componentes

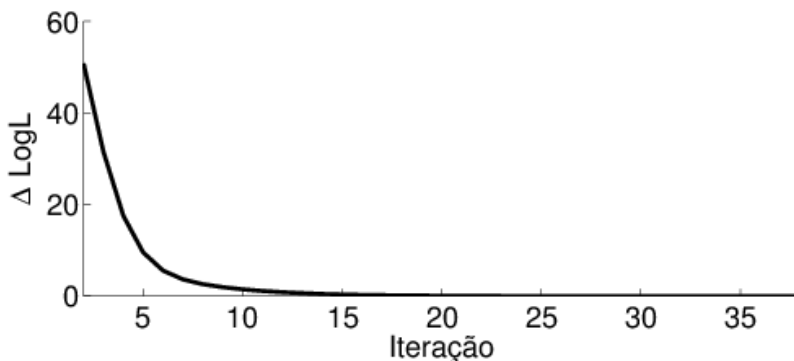
sendo associadas ao estado EI e as duas últimas componentes associadas ao estado IEE. O mesmo foi feito para os dados de água, porém sem separação entre grupos. Os pontos de intersecção entre quarta e quinta curvas também foram calculados e utilizados para agrupamento pelo método PC.

5.4 AGRUPAMENTO EM EPISÓDIOS

Estimadas as FDP referentes a cada situação experimental, para cada sequência individual registrada foram calculadas as matrizes de probabilidade de transição entre estados e de probabilidade de ocorrência inicial com o algoritmo de Baum-Welch, completando desta forma os parâmetros $\lambda = \{A, FDP, \pi\}$ para o modelo de cada registro individual.

O algoritmo de Baum-Welch (problema 3, pág. 40) busca, a cada iteração, ajustar os parâmetros do modelo de forma a maximizar $P(O|\lambda)$, isto é, a probabilidade das observações serem produzidas pelo dado modelo (verossimilhança). Esta probabilidade conjunta é normalmente muito pequena, especialmente para longas sequências de dados, e a forma corriqueira de expressá-la é por meio do logaritmo da verossimilhança, ou LogL (do inglês *log-likelihood*). A Figura 20 mostra, para uma sequência individual de IEB, a evolução da diferença entre os LogL a cada iteração. O algoritmo é interrompido quando o ΔLogL se torna menor que 0.001 ou quando forem realizadas 100 iterações (em nenhum caso o número de iterações ultrapassou 40).

Figura 20 - Variação do LogL (ou logaritmo da verossimilhança) para uma sequência individual de IEB. Todos os casos convergiram e terminaram em menos de 40 iterações.



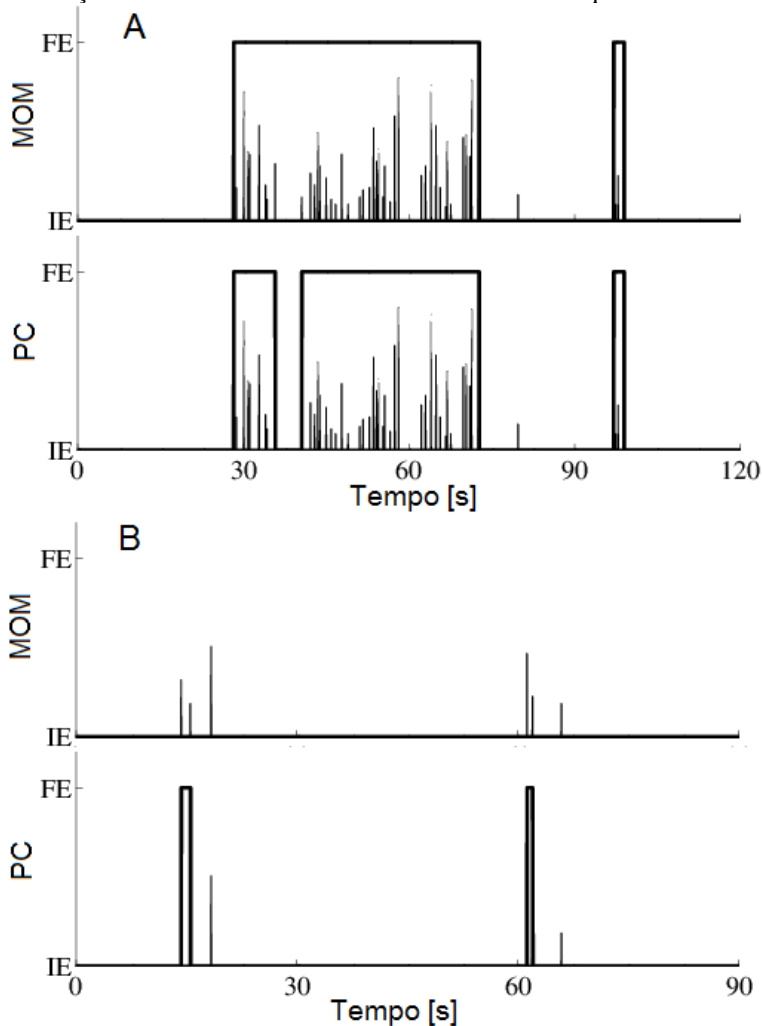
Em seguida foi utilizado o algoritmo de Viterbi (problema 2, pág. 39) para estimação da sequência de ocorrência de estados com máxima verossimilhança em relação às observações e aos parâmetros dos modelos. Os processamentos dos sinais de ração e água são feitos separadamente (são sinais provenientes de diferentes sensores) e, logo após, sobrepostos para o mesmo animal. Em paralelo, cada sequência foi também classificada pelo método de ponto-critério fixo, usando os pontos de intersecção entre as quarta e quinta curvas das distribuições de IEB.

A Figura 21 mostra, para as mesmas sequências individuais e em dois momentos distintos, os resultados da classificação por MOM e por PC. A componente AC do sinal, resultante das ações do animal, é representada em linha fina cinza e os EI identificados são representados em linha grossa negra.

No caso mostrado pela Figura 15-A, onde o MOM enxerga um único grupo o ponto-critério fixo classifica como duas visitas distintas. Isto se deve ao IEB ocorrer na região de alta mistura do modelo de Gaussianas e, nestes casos, a probabilidade de transição entre estados terá influência decisiva na classificação, Figura 16. Como exemplo, supondo-se que o IEB em questão (amostra i) possua igual probabilidade de ser emitido por ambos estados (valor do IEB_i = valor do ponto critério ou muito próximo deste) e que o animal que produziu a sequência ilustrada teve a probabilidade a_{12} (transição de IEE para EI) calculada em 0.7 e a_{22} (de EI para EI) em 0.9, a situação pode ser entendida da seguinte forma: a amostra posterior, IEB_{i+1} , foi classificada como EI (estado 2) que tem maior chance de ocorrer após estado 2 pois $a_{22} > a_{12}$ (o algoritmo de Viterbi busca de forma retroativa pelo caminho mais provável), portanto é mais provável que o IEB_i tenha sido emitido pelo estado 2.

Interpretação semelhante pode ser dada à situação mostrada pela Figura 15-B. Onde o método de ponto-critério fixo define que ocorreram visitas, o MOM assume que foram eventos fortuitos e que não possuem, estatisticamente, força suficiente para serem classificados como episódios. Nas duas situações fica evidente a capacidade do método proposto em capturar a característica do processo em curso de uma forma mais coerente do que os pontos-critério fixos os fariam.

Figura 21 - Resultados do agrupamento por MOM e por ponto-critério fixo. Nas duas situações o PC identificará um número maior de EI do que o MOM.



A Tabela 3 resume os resultados obtidos pela ANOVA de duas vias para dois métodos. Mesmo com valores p distintos, os resultados em termos de diferenças estatísticas foram os mesmos para ambos os métodos.

Tabela 3 - Resultados dos testes ANOVA duas vias para cada método. Os asteriscos marcam valores estatisticamente significantes (ao nível de 95% e marginalmente significantes).

Variável Dependente	Fator	MOM			PC		
		1-2h	3-4h	1-5h	1-2h	3-4h	1-5h
Nº de EI ração	Ração	*0.00	0.7	*0.00	*0.00	0.1	*0.00
	Jejum	0.2	0.3	0.3	0.1	0.6	0.3
	Interação	0.5	0.9	0.9	0.2	0.9	0.6
Nº de EI água	Ração	*0.04	*0.00	*0.00	*0.07	*0.00	*0.00
	Jejum	*0.00	0.3	0.2	*0.00	0.3	0.1
	Interação	0.7	*0.02	0.2	0.9	*0.02	0.1
Duração total EI ração	Ração	*0.00	0.7	*0.00	*0.00	0.8	*0.00
	Jejum	0.8	0.6	0.5	0.8	0.5	0.4
	Interação	0.9	0.7	0.9	0.9	0.7	0.9
Duração total EI água	Ração	*0.00	*0.01	*0.00	*0.00	*0.00	*0.00
	Jejum	*0.00	0.4	0.1	*0.00	0.7	0.2
	Interação	0.3	0.4	0.9	0.5	0.4	0.9
a ₁₂	Ração		*0.00		-	-	-
	Jejum		0.1		-	-	-
	Interação		0.6		-	-	-
a ₂₁	Ração		0.6		-	-	-
	Jejum		0.1		-	-	-
	Interação		0.4		-	-	-

Em relação ao número de episódios voltados à ração, não houve interação entre fatores e o período em jejum não causou alterações, enquanto que a ração palatável aumentou significativamente (MOM-160%, PC-270%) o número dessas visitas nas primeiras duas horas, mas não para o período de 3-4 h. Os efeitos das duas primeiras horas são sentidos no resultado acumulado do tempo total de experimento (aumento de: MOM-78%, PC-143%).

Estes resultados se repetiram quando examinado o tempo total dedicado a visitas ao comedouro de ração, com a ração palatável

provocando aumento significativo nas duas primeiras horas (MOM-127%, PC-130%) e no resultado acumulado (MOM-60%, PC-63%).

Quanto ao número de episódios voltados à água, durante as duas primeiras horas, houve aumento provocado pelo tempo em jejum (MOM-75%, PC-84%) e diminuição provocada pela ração palatável (MOM-26%, PC-23%). Durante o intervalo de 3-4 h houve interação significativa entre fatores e o teste post-hoc mostrou diminuição (MOM-41%, PC-45%) provocada pelo tempo em jejum apenas para animais com acesso à ração regular e diminuição provocada pela ração palatável (MOM-45%, PC-46%) independente do tempo em jejum. Para o período acumulado de 5 h, a ração palatável provocou diminuição do número de visitas (MOM-34%, PC-33%).

Para o tempo total dedicado a visitas ao comedouro de água, durante as duas primeiras horas, a ração palatável provocou diminuição (MOM-41%, PC-37%) e o tempo em jejum provocou aumento (MOM-109%, PC-108%). A ração palatável provocou, ainda, diminuição durante o intervalo de 3-4 h (MOM-54%, PC-56%) e para o período inteiro de 5 h (MOM-43%, PC-42%).

Tabela 4 - Resultados dos testes-t pareados para comparação entre métodos. Os asteriscos marcam valores estatisticamente significantes (ao nível de 95% e marginalmente significantes).

Variável Dependente	1-2h				3-4h				1-5h			
	CR	JR	CP	JP	CR	JR	CP	JP	CR	JR	CP	JP
Nº de EI ração	0.8	0.1	*0.00	*0.00	0.1	*0.00	*0.00	*0.01	0.9	*0.01	*0.00	*0.00
Nº de EI água	1.0	0.8	0.7	0.1	0.2	0.7	0.8	0.3	0.2	0.4	1.0	*0.04
Duração total EI ração	0.3	0.1	0.4	0.1	0.3	*0.02	0.4	0.1	0.3	*0.00	0.3	*0.07
Duração total EI água	0.2	0.6	0.4	0.2	0.6	0.6	0.1	0.3	0.3	0.7	0.4	0.4

A Tabela 4 resume os resultados dos testes-t pareados para comparação entre os dois métodos. Estes testes mostram em termos de quais variáveis os métodos diferem significativamente um do outro.

No intervalo de 1-2 h, os métodos mostram diferenças apenas quanto ao número de episódios voltados à ração. O método PC encontrou uma quantidade maior dessas visitas para os grupos CP (48%) e JP (41%). Para as outras variáveis não foram encontradas diferenças.

No intervalo de 3-4 h o método PC encontrou número maior de episódios voltados à ração para os grupos JR (12%), CP (37%) e JP (52%) e também quantidade maior de tempo dedicado a estes episódios para o grupo JR (3%).

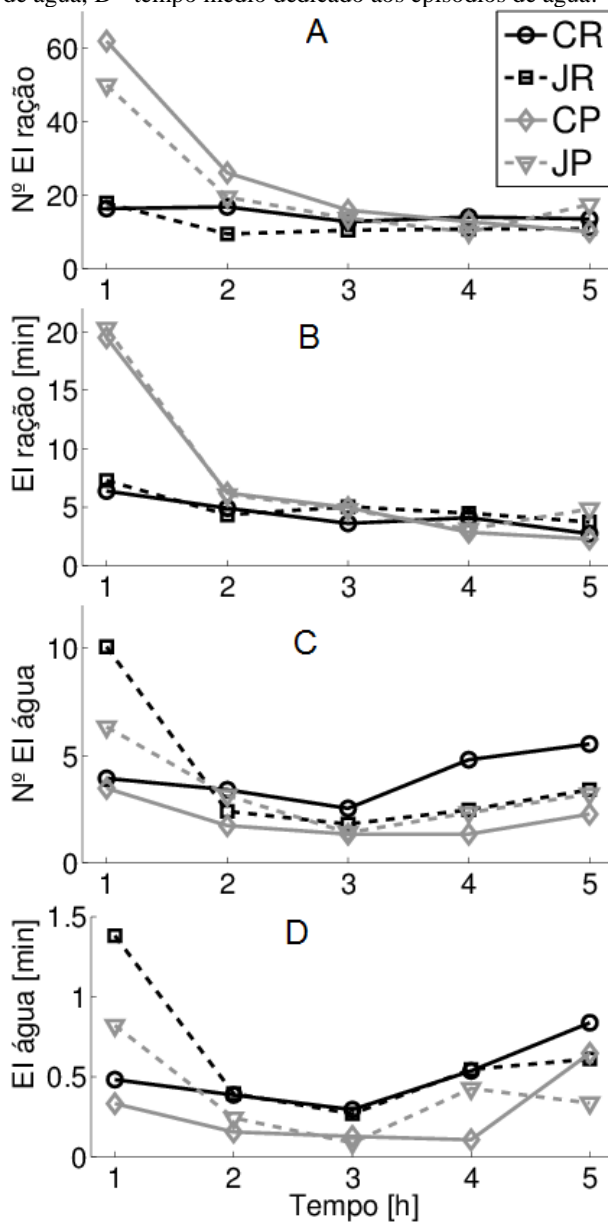
No tempo total de 5 horas o método PC também encontrou quantidade significativamente maior de episódios voltados à ração para os grupos JR (11%), CP (45%) e JP (41%) além de uma quantidade maior de episódios voltas à água para o grupo JP (7%). O método CP também encontrou quantidade maior de tempo dedicado aos episódios de ração para os grupos JR (2%) e JP (5%, marginalmente significativa).

De uma forma geral, percebe-se a propensão do método PC em identificar quantidades significativamente maiores de episódios em comparação ao método MOM, isto é, casos como os ilustrados pela Figura 21 parecem ocorrer frequentemente. Mesmo com as diferenças encontradas entre métodos, os resultados gráficos para os dois métodos são similares.

A Figura 22 mostra os resultados médios por hora para o número e duração dos episódios obtidos pelo método de MOM. Percebe-se visualmente o aumento na quantidade e duração total dos EI voltados à ração nas duas primeiras horas provocado pela ração palatável. Também é visível o aumento na quantidade e duração dos EI voltados à água provocados pelo período em jejum e diminuição dos mesmos pela apresentação da ração palatável.

Em resumo, na comparação entre os efeitos provocados pelas manipulações alimentares, ambos os métodos exibiram os mesmos resultados: durante as duas primeiras horas, a ração palatável provocou aumento no número e duração total dos EI voltados à ração enquanto que o jejum não provocou alteração nestes valores. A ração palatável causou diminuição no número e duração total dos EI voltados à água, enquanto que o jejum provocou aumento em ambas as medidas. O método PC encontrou um número maior de EI que o método MOM em situações onde houve estímulo aumentado de interesse pelo alimento.

Figura 22 - A- Frequência média de ocorrência de episódios de ração, B- tempo médio dedicado aos episódios de ração, C- frequência média de ocorrência de episódios de água, D- tempo médio dedicado aos episódios de água.



5.5 AGRUPAMENTO EM ESTADOS MOTIVACIONAIS

Buscou-se por unidades mais robustas no tempo do que os episódios ingestivos que pudessem representar mudanças mais graduais na motivação que apenas dois estágios (como acontece na segmentação por refeições). Para isso, foram levados em consideração não somente os intervalos entre episódios, mas também a duração destes.

Os sinais resultantes da primeira etapa de classificação (sequências de EI e IEE) para ração e água foram somados, formando uma sequência única de EI e IEE para cada animal em cada grupo e dando origem a novos intervalos entre episódios. Estes intervalos, bem como as durações dos episódios, foram log-transformados e agrupados por situação experimental. As distribuições de frequência de ocorrência de EI e IEE, para cada grupo, foram então modelados por misturas de Gaussianas com três componentes, com cada componente associada a um estado do MOM.

A Figura 23 mostra, para o grupo CR, o resultado do ajuste de curvas Gaussianas às distribuições de EI (23-A) e IEE (23-B). Ao EAI foram associadas componentes representando longos EI e curtos IEE, ao EMI foram associadas componentes representando médios EI e IEE e ao EBI foram associadas componentes representando curtos EI e longos IEE, como ilustrado na Figura 23-C, onde também se vê a estrutura geral adotada para os MOM desta etapa, com as possíveis transições entre estados.

As sequências individuais de EI e IEE foram então usadas pelo algoritmo de Baum-Welch para estimativa dos parâmetros individuais do MOM (matriz de transição e probabilidades iniciais) e pelo algoritmo de Viterbi para a classificação em estados. A Figura 24 mostra, para os 15 primeiros minutos de registro, o resultado da classificação para um mesmo animal em condição CR (24-A) e condição JR (24-B).

Figura 23 - Resultados do ajuste de curvas para a distribuição de EI (A) e IEE (B) do grupo CR. A linhas tracejadas em cinza representam as componentes e as linhas contínuas negras a soma do modelo. Estrutura geral do MOM para classificação em estados, com parâmetros calculados para o grupo CR (C).

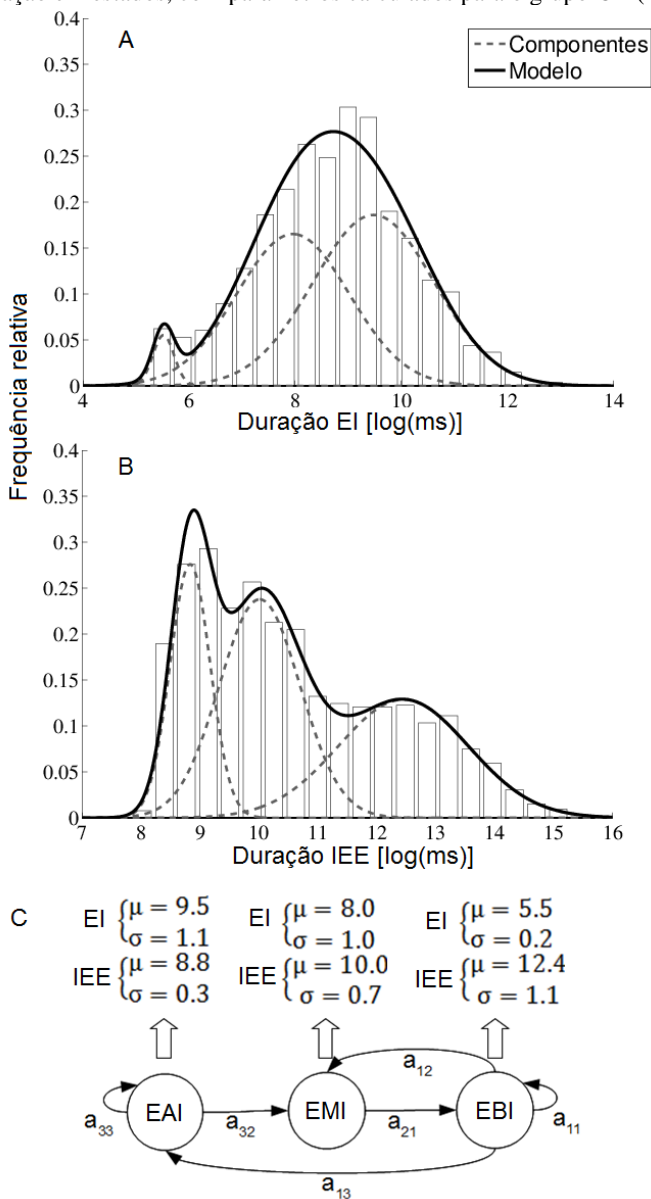


Figura 24 - Resultado da classificação em três estados motivacionais para os primeiros 15 minutos de um mesmo animal em condição CR (A) e JR (B).

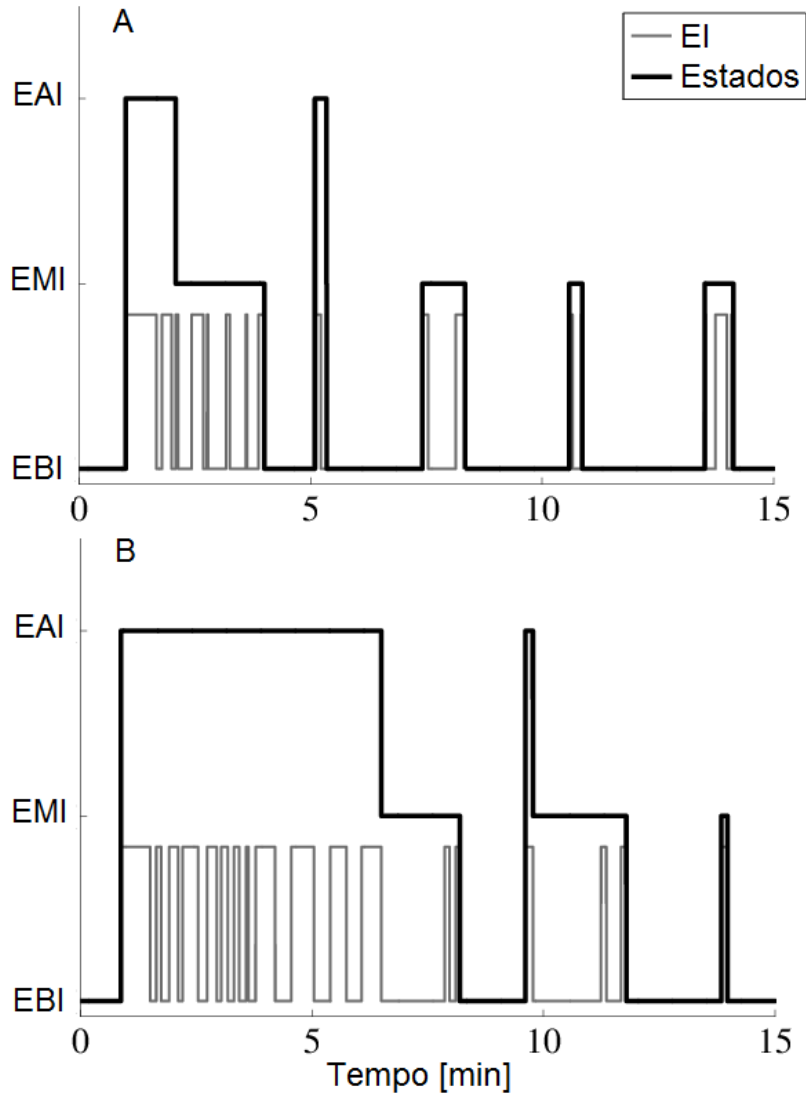


Tabela 5 - Resultados dos testes ANOVA duas vias para a classificação em estados. Os asteriscos marcam valores estatisticamente significantes (ao nível de 95% e marginalmente significantes).

Variável Dependente	Estado	Fator	1-2h	3-4h	1-5h
% de tempo	EBI	Ração	*0.00	0.3	*0.02
		Jejum	0.5	1.0	0.8
		Interação	0.2	0.4	0.2
	EMI	Ração	*0.01	*0.06	0.6
		Jejum	*0.02	0.3	*0.04
		Interação	0.2	0.8	0.3
	EAI	Ração	*0.00	1.0	*0.00
		Jejum	0.3	0.2	0.1
		Interação	0.5	0.2	0.3
% consumo de ração	EBI	Ração	*0.00	1.0	0.1
		Jejum	*0.03	0.1	0.1
		Interação	0.9	0.7	0.8
	EMI	Ração	0.7	0.3	0.6
		Jejum	*0.00	0.2	*0.00
		Interação	0.2	0.7	0.1
	EAI	Ração	*0.06	0.3	1.0
		Jejum	*0.05	0.2	*0.03
		Interação	0.4	*0.03	0.1
% consumo de água	EBI	Ração	0.3	0.8	0.7
		Jejum	0.1	1.0	0.4
		Interação	0.7	0.9	0.5
	EMI	Ração	0.6	0.3	0.1
		Jejum	*0.00	*0.07	*0.01
		Interação	1.0	0.5	0.6
	EAI	Ração	0.4	0.4	0.8
		Jejum	*0.00	*0.02	*0.00
		Interação	0.4	1.0	0.5

A Tabela 5 resume os resultados dos testes ANOVA de duas vias feitos para análise do efeito dos fatores (tempo em jejum e ração palatável) no tempo despendido e na porcentagem de consumo de ração e água em cada estado.

No intervalo de 1-2 h, a ração palatável diminui o tempo dedicado ao EBI (em 24%) enquanto aumenta o tempo no EMI (em 74%) e no EAI (em 130%). A ração palatável também diminui a ingestão de ração em EBI (em 55%) enquanto aumenta para o EAI (em 20%). O período em jejum diminui o tempo no EMI (em 37%), não alterando significativamente os outros estados, e provoca diminuição da ingestão de água no EMI (em 52%) aumentando no EAI (em 78%). O jejum ainda diminui a ingestão de ração no EBI (em 40%) e EMI (em 47%), aumentando no EAI (em 22%).

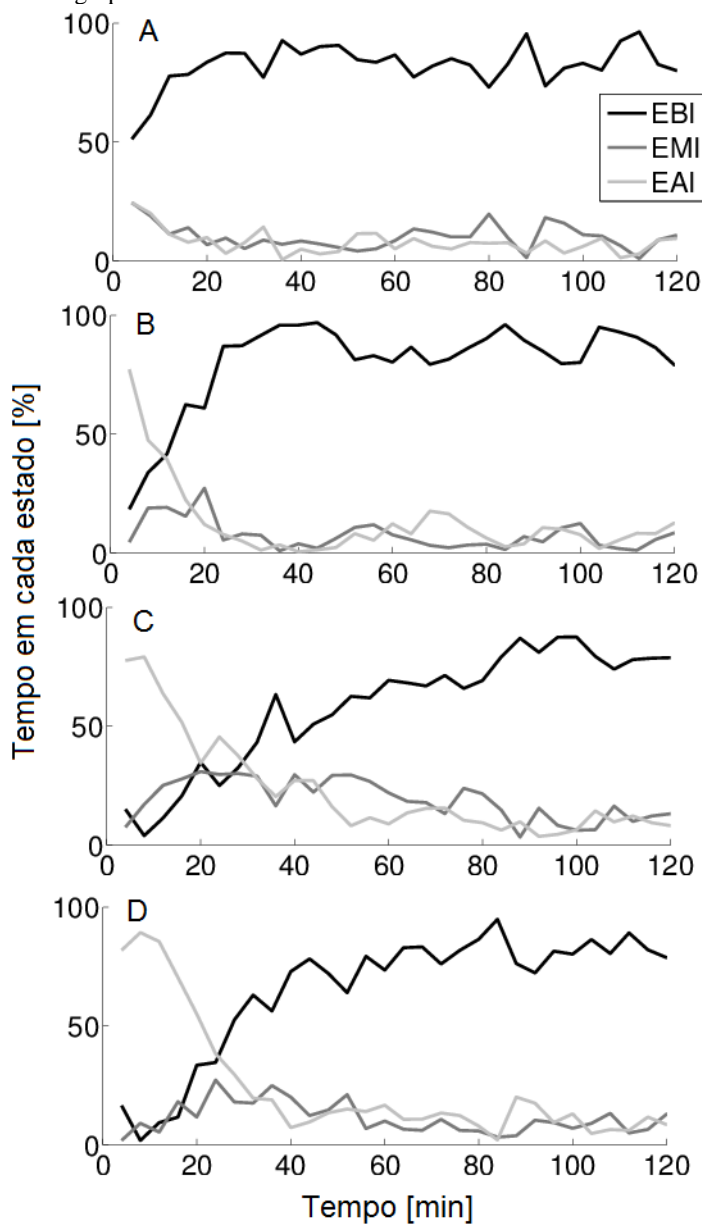
No intervalo de 3-4 h, a ração palatável provocou diminuição no tempo dedicado ao EMI (em 34%). O período em jejum provocou diminuição na ingestão de água em EMI (em 33%) enquanto aumentou em EAI (em 73%).

No resultado acumulado durante as cinco horas de experimento, a ração palatável causou diminuição no tempo dedicado ao EBI (em 17%) e aumento no EAI (em 70%). O período em jejum provocou diminuição do tempo no EMI (em 28%), não alterando os outros estados, e diminui a ingestão de água no EMI (em 35%) aumentando em EAI (em 54%). O jejum também provocou diminuição na ingestão de ração em EMI (em 37%) aumentando em EAI (em 27%).

Em resumo, a ração palatável diminuiu o consumo de ração e o tempo dedicado ao EBI enquanto que aumentou ambas as medidas para o EAI. O jejum não alterou o tempo dedicado aos estados EBI e EAI enquanto que diminui a ingestão de ração em EBI e aumentou em EAI, sugerindo uma alteração de eficiência nestes estados. O jejum também provocou diminuição do consumo de água no EMI e aumento no EAI.

A Figura 25 mostra as alterações gradativas na porcentagem de tempo dedicada a cada estado, por cada situação experimental, nas duas primeiras horas de experimento. Percebe-se que os animais na condição CR (22-A) mantêm os tempos em EAI e EMI constantemente baixos, enquanto que os grupos que sofreram alguma manipulação alimentar apresentam visualmente um aumento no tempo dedicado ao EAI no início do experimento, sendo que este estado de alto interesse prevalece sobre os outros por aproximadamente trinta minutos nas apresentações de ração palatável (22-C e 22-D).

Figura 25 - Porcentagem de tempo dedicada a cada estado motivacional, durante as duas primeiras horas de experimento. A - grupo CR, B - grupo JR, C - grupo CP e D - grupo JP.



6 DISCUSSÃO

O sistema de registro de atividade alimentar desenvolvido se mostrou capaz de registrar continuamente a progressão temporal do consumo de ração e água por longos períodos de tempo, permitindo identificar os momentos de grande ou baixa ingestão com imprecisão máxima de ± 0.27 g (valor eficaz). As ações dos animais voltadas à ração e água se apresentam no sinal de registro em amplitudes consideravelmente maiores que o ruído presente, o que permite a identificação dos momentos de ocorrência destes eventos com certa facilidade. A taxa média de perda de pacotes do sistema é de aproximadamente 0.5%, possivelmente devido a instabilidades no dispositivo de transmissão.

O presente trabalho não investigou os efeitos das manipulações alimentares na intensidade com que o animal se dirige à ração, ou seja, a força das bicadas. Porém, o sistema construído é capaz de fornecer, dentro da faixa de erro do mesmo, as medidas necessárias para tais análises. Deve-se atentar ao fato de que a quantidade de ração entre a superfície e o fundo do pote alimentador pode provocar amortecimento da força aplicada, fazendo com que o valor final medido seja diferente de valores de força de bicadas de resposta condicionada aplicadas a chaves interruptoras, encontradas na literatura (LAMON; ZEIGLER, 1988; RILLING; KRAMER; ASKEW, 1970).

O sistema é incapaz de reconhecer quando um grão é jogado para fora ou quando é efetivamente ingerido. Em casos onde o desperdício é grande, a avaliação do experimento pode ficar comprometida. A estrutura dos potes alimentadores deve ser repensada e, se possível, remontada de forma a minimizar ainda mais o arremesso de grãos para fora do comedouro.

Nossos dados sugerem que a motivação alimentar, em termos de consumo e número de ações voltadas ao alimento, é alta no decorrer das duas primeiras horas de experimento. A Tabela 2 resume características importantes do perfil alimentar e mostra como este é alterado pelas manipulações alimentares: ambos os estímulos provocam aumento na ingestão durante as duas primeiras horas e diminuição nas duas horas seguintes (período quiescente). O período em jejum aumenta significativamente o consumo de água durante as duas primeiras horas, porém em menor grau se a ração for palatável. A ração palatável provocou aumento significativo no número de ações voltadas à ração, enquanto que o tempo em jejum não causou alteração.

Na modelagem da distribuição dos IEB, a aproximação do ponto de cruzamento entre as quarta e quinta curvas ao eixo das ordenadas, isto é, a relativa diminuição do valor do ponto-critério quando apresentados à ração palatável, pode indicar que a microestrutura do comportamento alimentar é modulada em certo grau pelo tipo de ração. Uma forma de investigar se esta diminuição é realmente significativa seria estimar as distribuições e pontos-critério individualmente em um número de indivíduos suficiente para a análise de diferença estatística. Para que se tenha massa de dados suficiente para um adequado ajuste de curvas (quantidade de IEB longos, principalmente), deveriam ser registrados os sinais individuais, durante o período claro, por vários dias. Isto é possível de ser feito com o sistema construído.

Os grãos que compõem a ração palatável (painço e aveia) possuem características morfológicas distintas dos grãos de ração regular, sendo os primeiros menores e consideravelmente mais leves. Portanto, alguns efeitos provocados pela ração palatável podem não ser inteiramente devidos à motivação hedônica, mas também relacionados a alterações no conjunto de movimentos estereotipados de obtenção e deglutição dos grãos (ZEIGLER; LEVITT; LEVINE, 1980).

Seria interessante, portanto, uma investigação mais minuciosa quanto ao efeito do formato e peso dos grãos de ração nos padrões de bicada do pombo. Para isto, seria necessário identificar, a cada bicada, se houve ou não retirada de grãos e quanto foi retirado. Isto exigiria uma resolução de registro na escala do peso médio do grão de painço, em torno de 7 mg, e não foi encontrada opção viável no mercado que cumprisse esta exigência juntamente com a velocidade de registro requerida. Uma forma alternativa é o registro por vídeos em alta resolução sobre a superfície do alimento no comedouro, de forma a visualizar se houve ou não retirada de grãos.

Para isolar possíveis influências da morfologia dos grãos no resultado comportamental, pode-se buscar por grãos de padrões estruturais semelhantes, mas com características de sabor/cheiro distintas. Adulterar os grãos de ração regular também pode ser uma opção.

Os intervalos entre bicadas (IEB) de comida (bicadas efetivas) e água (picos de sinal) serviram para a primeira etapa de classificação, identificação de episódios ingestivos (EI), que podem ser interpretados como visitas aos comedouros. A comparação entre as duas metodologias mostra que o método proposto (MOM com funções de probabilidade de emissão contínuas) é mais provável de encontrar uma quantidade menor destes episódios em relação ao método por PC, principalmente em

situações onde o animal tem interesse aumentado pela ração/água e isto pode ser vantajoso em situações como aqui apresentadas. Por exemplo, o método PC não incluirá em um episódio ingestivo IEB que sejam minimamente maiores que o critério estabelecido (Figura 21-A), enquanto que o método MOM é capaz de levar o contexto em consideração.

Também, a unidade EI tem o propósito de ser uma representação mais robusta (menos sensível, variável) do comportamento animal em relação à ração/água do que são as ações de bicadas. Nestas situações experimentais, os pombos interagem quase que constantemente com os comedouros e este comportamento gera ações isoladas no tempo (Figura 21-B). Nos casos destas ações esparsas, os MOM deram maior rigor estatístico à classificação do que os pontos-critério fixos, evitando que eventos fortuitos sejam tomados por episódios efetivos. Considerações semelhantes a respeito de um “valor mínimo” para classificação de uma série de bicadas em um episódio podem ser encontradas também em outros trabalhos com pombos (ZEIGLER; GREEN; LEHRER, 1971).

Indícios apontam que, caso sejam adotados pontos-critério fixos, estes são dependentes da situação motivacional. O critério utilizado anteriormente no laboratório, 3 segundos, está próximo dos pontos de intersecção resultantes das condições experimentais com ração palatável (CP e JP) enquanto pode superestimar a ocorrência de episódios ingestivos para as situações com ração regular (CR e JR).

Quando comparados os grupos em respeito a tempo e número de episódios de ração e água, as duas metodologias apontaram as mesmas diferenças, Tabela 3. Durante as duas primeiras horas, a ração palatável aumentou a quantidade de episódios de ração e o tempo dedicados a eles, enquanto diminuiu a quantidade de episódios de água e o tempo dedicado a eles. Para o mesmo intervalo, o período em jejum provocou aumento no tempo e quantidade de episódios voltados à água, não alterando os episódios voltados à ração.

Estes resultados indicam que a motivação de natureza metabólica ou homeostática (provocada pelo período de 24 horas em jejum) está relacionada com um aumento de eficiência na ingestão de comida, pois o animal aumenta o consumo sem alterar significativamente o tempo dedicado a isso. A motivação de natureza hedônica (provocada pela apresentação de ração palatável) se mostra relacionada com um maior interesse geral pela comida, pois provoca aumento tanto no tempo e quantidade de episódios quanto no consumo de ração.

Os episódios ingestivos também não produziram resultados seguros em relação à ingestão efetiva de grãos de ração palatável.

Mesmo que estas unidades sejam compostas de várias bicadas e que, por consequência, englobem quantidades maiores de grãos retirados, estas quantidades ainda não são suficientes para sobressair à faixa de erro mínima do sensor de peso. Dadas estas limitações, não foi possível analisar o quanto do comportamento voltado à ração se deve a ingestão efetiva e o quanto se deve à exploração de recursos.

Os episódios ingestivos trouxeram um significado de duração temporal do comportamento não presente nas ações primárias, pois as bicadas são entendidas como eventos instantâneos. Ainda assim, são unidades binárias (o animal está comendo ou não está comendo) e representativas de períodos curtos de tempo. A segunda etapa de classificação buscou unidades ainda mais robustas no tempo (estados com durações mais longas e menor frequência de transições) e que considerassem mudanças graduais na motivação do animal.

Os resultados desta classificação em três estados motivacionais distintos permitiram compreender de que forma algumas medidas de interesse (tempo e consumo de ração e água) estão associadas ao estado de interesse do animal pelo alimento. Estas dinâmicas puderam ser mais bem percebidas nas duas primeiras horas de experimento.

Quando apresentados à ração palatável, os animais aumentam o tempo dedicado ao estado de alto interesse (de 10% para 23%) bem como a quantidade de ração consumida neste estado (de 55% para 66%) ao mesmo tempo em que diminuem o tempo dedicado ao estado de baixo interesse (de 81% para 62%) e a quantidade de ração ingerida neste estado (de 22% para 10%). Isto aponta um aumento de importância do EAI e diminuição na importância do EBI na motivação alimentar. O tempo dedicado ao estado de médio interesse é aumentado (de 9% para 15%), mas não a quantidade de ração consumida.

A ração palatável é composta por grãos de painço e aveia, que possuem peso médio (7 e 75 mg, respectivamente) expressivamente menor que o peso médio da ração regular (240 mg). Como o comportamento regular do pombo é a retirada de apenas um grão por vez (ZEIGLER; LEVITT; LEVINE, 1980), para o consumo da mesma quantidade de massa de ração é necessário um maior número de bicadas. Dessa forma, não foi possível fazer qualquer tipo de análise de eficiência na comparação entre ração regular e palatável.

O período em jejum atua diminuindo o consumo de ração no EBI (de 21% para 12%) e aumentando no EAI (de 54% para 66%), mas mantendo o tempo dedicado a estes dois estados. Isto é, os estados de baixo e alto interesse mantém suas importâncias na construção temporal do comportamento, porém perdem e ganham, respectivamente,

importância no consumo de ração. Isto indica, ainda, que o aumento na eficiência de obtenção de alimento provocado pelo estímulo metabólico e percebido nas análises anteriores se deve ao aumento na eficiência durante o EAI.

Os efeitos das manipulações alimentares são bem caracterizados nas duas primeiras horas de experimento e, em alguns casos, ocorre inversão do efeito nas duas horas seguintes. Dado isto, é importante compreender as limitações do resultado acumulado em cinco horas de experimento, pois se trata da média de suas situações distintas. Os dados obtidos (Figura 25) sugerem que os resultados acumulados em duas horas também disfarçam dinâmicas internas e, para o estudo de manipulações com efeitos mais curtos, é importante análise em intervalos menores.

A segunda etapa de classificação não demonstrou a robustez temporal esperada para ser associada diretamente às condições motivacionais subjacentes à sequência comportamental de saciedade, exibindo várias transições em questão de minutos. Como estas unidades (estados motivacionais) são inferidas a partir do comportamento voltado ao alimento, uma possível razão para esta variabilidade é a não regularidade do próprio comportamento. Isto é, apesar da SCS representar claramente a diminuição gradativa do interesse do animal pela ração/água, este fluxo motivacional pode não ser de constante queda, mas exibir curtos lapsos de subida, provocando visitas aos comedouros mais breves e isoladas.

Essa quantidade de transições entre estados além do esperado também pode ser explicada pela característica do método de transformação de dados escolhido, por logaritmo natural. Esta transformação funciona particularmente bem para intervalos curtos, porém na escala logarítmica os intervalos extremamente longos se aproximam de intervalos medianos; por exemplo, na Figura 23-B, a primeira curva representa principalmente IEE de até 9 s e a terceira curva pega IEE desde 60 s até intervalos bem maiores (*e.g.*, 20 min). Outras transformações de dados poderiam ser investigadas de forma a separar melhor estes intervalos medianos de intervalos realmente longos. A transformação de *Box-Cox* pode ser uma alternativa interessante, podendo-se fazer uma varredura de valores para o parâmetro de transformação até que se obtenha uma separação satisfatória entre intervalos médios e longos.

Somando-se à transformação possivelmente inadequada dos dados, a busca por curvas descritivas de grupo (ou *pooling* de dados) é

provável de negligenciar características individuais e, portanto, acrescentar imprecisão à classificação.

A estrutura do MOM foi definida empiricamente e as suposições de relação entre estados motivacionais e as durações de EI e IEE podem não ser suficientes para uma caracterização suficiente da motivação alimentar. Uma vez que a SCS consiste em uma ordem de predominância bem definida de atividades físicas, *e.g.* auto-limpeza, exploração e sono, e estas atividades apresentam graus de agitação corporal diferentes, medidas de movimentação corporal possivelmente colaborem para construção de modelos mais fiéis representativos da motivação. Sensores de actimetria, bem como registros em vídeo poderiam fornecer estas informações.

Estruturar a classificação motivacional em mais do que apenas duas condições e pautar as análises nas dinâmicas de transferência de importância entre estes distintos estados pode ser interessante especialmente para estudos de efeitos dose-dependentes de drogas, onde alguns aspectos da motivação não mudam abruptamente, mas sim se transferem gradualmente de níveis baixos a níveis altos passando por etapas intermediárias.

7 CONCLUSÕES

A utilização do sistema desenvolvido nos experimentos descritos resultou em um banco de dados com mais de 670 horas de registros com os animais em distintas condições. Os módulos contendo os transdutores de força foram projetados de forma a facilitar a adaptação de diferentes tipos de vasilhames. O módulo eletrônico de aquisição e transmissão dos sinais e o software de interface com o usuário e registro dos dados foram desenvolvidos para serem de fácil utilização por qualquer pesquisador sem o mínimo conhecimento de eletrônica ou programação. A análise numérica dos dados, porém, exige o conhecimento de alguma linguagem de programação.

Os resultados sugerem que a aplicação dos modelos ocultos de Markov para classificação comportamental pode fornecer resultados mais coerentes que o método padrão de classificação por pontos-critério fixos. Apesar disto, ambos os métodos encontraram as mesmas diferenças provocadas pelas manipulações alimentares.

A metodologia empregada permitiu a caracterização de estruturas motivacionais a partir de unidades comportamentais simples, durações de episódios ingestivos e intervalos entre estes. Estas informações, porém, parecem não ser suficientes para classificação do fluxo motivacional subjacente à SCS em três condições plenas e duradouras; dados de quantidades ingeridas e indicadores de agitação corporal poderiam fortalecer os modelos nesta direção.

BIBLIOGRAFIA

AAS, K.; EIKVIL, L.; HUSEBY, R. B. Applications of hidden Markov chains in image analysis. **Pattern Recognition**, v. 32, n. 4, p. 703-713, abr. 1999.

ALLCROFT, D. J.; TOLKAMP, B. J.; GLASBEY, C. A.; KYRIAZAKIS, I. The importance of “memory” in statistical models for animal feeding behaviour. **Behavioural Processes**, v. 67, n. 1, p. 99-109, 30 jul. 2004.

BAGNIEWSKA, J. M.; HART, T.; HARRINGTON, L. A.; MACDONALD, D. W. Hidden Markov analysis describes dive patterns in semiaquatic animals. **Behavioral Ecology**, v. 24, n. 3, p. 659-667, 1 maio. 2013.

BERDOY, M. Defining bouts of behaviour: a three-process model. **Animal Behaviour**, v. 46, n. 2, p. 387-396, ago. 1993.

BERRIDGE, K. C. Motivation concepts in behavioral neuroscience. **Physiology & Behavior**, v. 81, n. 2, p. 179-209, abr. 2004.

BERTSCH, G. J.; BECKER, R. AN INEXPENSIVE FOOD-PECK RECORDER FOR PIGEONS. **Journal of the Experimental Analysis of Behavior**, v. 20, n. 1, p. 71-72, 1973.

BOUMAN, C. A. **Cluster: An unsupervised algorithm for modeling Gaussian mixtures**, 1997. Disponível em:
<<https://engineering.purdue.edu/~bouman/software/cluster/>>

CAMPANELLA, L. C. A.; SILVA, A. A. DA; GELLERT, D. S.; PARREIRA, C.; RAMOS, M. C.; PASCHOALINI, M. A.; MARINONETO, J. Tonic serotonergic control of ingestive behaviours in the pigeon (*Columba livia*): The role of the arcopallium. **Behavioural Brain Research**, v. 205, n. 2, p. 396-405, 28 dez. 2009.

CAROLA, V.; MIRABEAU, O.; GROSS, C. T. Hidden Markov Model Analysis of Maternal Behavior Patterns in Inbred and Reciprocal Hybrid Mice. **PLoS ONE**, v. 6, n. 3, p. e14753, 8 mar. 2011.

CARR, J. A. Stress, Neuropeptides, and Feeding Behavior: A Comparative Perspective. **Integrative and Comparative Biology**, v. 42, n. 3, p. 582-590, 1 jul. 2002.

CLIFTON, P. G. Meal patterning in the red-billed weaver bird (*Quelea quelea*). **Journal of Comparative and Physiological Psychology**, v. 96, n. 2, p. 297-306, 1982.

CRISPIM JUNIOR, C. F.; PEDERIVA, C. N.; BOSE, R. C.; GARCIA, V. A.; LINO-DE-OLIVEIRA, C.; MARINO-NETO, J. ETHOWATCHER: validation of a tool for behavioral and video-tracking analysis in laboratory animals. **Computers in Biology and Medicine**, v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2012.

DEAN, B.; FREEMAN, R.; KIRK, H.; LEONARD, K.; PHILLIPS, R. A.; PERRINS, C. M.; GUILFORD, T. Behavioural mapping of a pelagic seabird: combining multiple sensors and a hidden Markov model reveals the distribution of at-sea behaviour. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 10, n. 78, 6 jan. 2013.

ELDAR, E.; MORRIS, G.; NIV, Y. The effects of motivation on response rate: A hidden semi-Markov model analysis of behavioral dynamics. **Journal of Neuroscience Methods**, v. 201, n. 1, p. 251-261, 30 set. 2011.

FELDMAN, A.; BALCH, T. **Automatic identification of bee movement**, Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2003.

FINK, G. A. **Markov Models for Pattern Recognition: From Theory to Applications**. Springer, 2007.

FRANKE, A.; CAELLI, T.; KUZYK, G.; HUDSON, R. J. Prediction of wolf (*Canis lupus*) kill-sites using hidden Markov models. **Ecological Modelling**, v. 197, n. 1-2, p. 237-246, 10 ago. 2006.

GEARY, N. A new way of looking at eating. **American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology**, v. 288, n. 6, p. R1444-6, jun. 2005.

GONÇALVES, W.; ANDRADE SILVA, J.; MACHADO, B.; PISTORI, H.; SOUZA, A. Hidden Markov Models Applied to Snakes Behavior

Identification. In: MERY, D.; RUEDA, L. **Advances in Image and Video Technology**. Springer Berlin Heidelberg, 2007. v. 4872, p. 777-787.

HÄCKL, L. P. N.; OLIVEIRA RICHTER, G. DE; SERRALVO FARIA, M.; PASCHOALINI, M. A.; MARINO-NETO, J. Behavioral effects of 8-OH-DPAT injections into pontine and mesencephalic areas containing 5-HT-immunoreactive perikarya in the pigeon. **Brain Research**, v. 1035, n. 2, p. 154-167, 28 fev. 2005.

HAGEMANN, L. F.; COSTA, C. V.; ZENI, L. Z. R.; FREITAS, C. G.; MARINO-NETO, J.; PASCHOALINI, M. A. Food intake after adrenaline and noradrenaline injections into the hypothalamic paraventricular nucleus in pigeons. **Physiology & Behavior**, v. 64, n. 5, p. 645-652, jul. 1998.

HALFORD, J. C. G.; WANNINAYAKE, S. C. D.; BLUNDELL, J. E. Behavioral Satiety Sequence (BSS) for the Diagnosis of Drug Action on Food Intake. **Pharmacology Biochemistry and Behavior**, v. 61, n. 2, p. 159-168, out. 1998.

HOELLER, A. A.; SANTOS, T. S. DOS; BRUXEL, R. R.; DALLAZEN, A. R.; AMARAL SILVA, H. T. DO; ANDRÉ, E. S.; MARINO-NETO, J. Serotonergic control of ingestive and post-ingestive behaviors in pigeons (*Columba livia*): The role of 5-HT1A receptor-mediated central mechanisms. **Behavioural Brain Research**, v. 236, p. 118-130, 1 jan. 2013.

HÖRSTER, W.; KRUMM, E.; MOHR, C.; DELIUS, J. D. Conditioning the pecking motions of pigeons. **Behavioural Processes**, v. 58, n. 1-2, p. 27-43, 28 maio. 2002.

HOWIE, J. A.; TOLKAMP, B. J.; AVENDAÑO, S.; KYRIAZAKIS, I. A novel flexible method to split feeding behaviour into bouts. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 116, n. 2-4, p. 101-109, 31 jan. 2009.

HOWIE, J. A.; TOLKAMP, B. J.; BLEY, T.; KYRIAZAKIS, I. Short-term feeding behaviour has a similar structure in broilers, turkeys and ducks. **British Poultry Science**, v. 51, n. 6, p. 714-724, 1 dez. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY.
OIML R60 - Metrological Regulations for Load Cells. Paris, 2000.
Disponível em: <<http://www.oiml.org>>

KOOLHAAS, J. M.; BOER, S. F. DE; BOHUS, B. Motivational systems or motivational states: Behavioural and physiological evidence. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 53, n. 1, p. 131-143, 1 maio. 1997.

LAMON, B.; ZEIGLER, H. P. Control of pecking response form in the pigeon: Topography of ingestive behaviors and conditioned keypecks with food and water reinforcers. **Animal Learning & Behavior**, v. 16, n. 3, p. 256-267, 1988.

LANGROCK, R.; KING, R.; MATTHIOPOULOS, J.; THOMAS, L.; FORTIN, D.; MORALES, J. M. Flexible and practical modeling of animal telemetry data: hidden Markov models and extensions. **Ecology**, v. 93, n. 11, p. 2336-2342, 15 jun. 2012.

LIDGARD, D. C.; BOWEN, W. D.; JONSEN, I. D.; IVERSON, S. J. Animal-Borne Acoustic Transceivers Reveal Patterns of at-Sea Associations in an Upper-Trophic Level Predator. **PLoS ONE**, v. 7, n. 11, p. e48962, 14 nov. 2012.

LIMPERT, E.; STAHEL, W. A.; ABBT, M. Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. **BioScience**, v. 51, n. 5, p. 341-352, 1 maio. 2001.

METZ, J. H. M. **Time patterns of feeding and rumination in domestic cattle**. Universidade de Wageningen, 1975.

OLIVEIRA, L. DOS S.; SOUZA, S. L. DE; MANHÃES-DE-CASTRO, R. Behavioral satiety sequence: an experimental model for studying feeding behavior. **Revista de Nutrição**, v. 24, p. 619-628, 2011.

PATTERSON, T. A.; BASSON, M.; BRAVINGTON, M. V; GUNN, J. S. Classifying movement behaviour in relation to environmental conditions using hidden Markov models. **Journal of Animal Ecology**, v. 78, n. 6, p. 1113-1123, 2009.

PEREIRA, G. V. **Sistema instrumentado para o registro de comportamentos ingestivos**. Florianópolis, SC, 20 out. 2003.

RABINER, L. R. **A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition**. Proceedings of the IEEE. vol. 77, n. 2, p. 257-286, 1989.

RILLING, M.; KRAMER, T. J.; ASKEW, H. R. A preliminary analysis of the dynamics of the pecking response in pigeons. **Journal of the experimental analysis of behavior**, v. 13, n. 2, p. 267-78, mar. 1970.

RODGERS, R. J.; HOLCH, P.; TALLETT, A. J. Behavioural satiety sequence (BSS): Separating wheat from chaff in the behavioural pharmacology of appetite. **Pharmacology Biochemistry and Behavior**, v. 97, n. 1, p. 3-14, nov. 2010.

SANTOS, M. M. DOS; HOELLER, A. A.; SANTOS, T. S. DOS; FELISBINO, M. B.; HERDT, M. A.; SILVA, E. S. DA; PASCHOALINI, M. A.; MARINO-NETO, J. Behavioural and electroencephalographic effects of systemic injections of 8-OH-DPAT in the pigeon (*Columba livia*). **Behavioural Brain Research**, v. 201, n. 2, p. 244-256, 12 ago. 2009.

SANTOS, T. S. DOS. **Efeitos comportamentais e sobre a expressão da proteína Fos em neurônios serotoninérgicos após injeções intracerebroventriculares de serotonina em pombos (*Columba livia*)** Florianópolis, 25 out. 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93983>>. Acesso em: 16 abr. 2013

SANTOS, T. S. DOS; MENEGHELLI, C.; HOELLER, A. A.; PASCHOALINI, M. A.; ARCKENS, L.; LINO-DE-OLIVEIRA, C.; MARINO-NETO, J. Behavioral profile and Fos activation of serotonergic and non-serotonergic raphe neurons after central injections of serotonin in the pigeon (*Columba livia*). **Behavioural Brain Research**, v. 220, n. 1, p. 173-184, 20 jun. 2011.

SCHLIEHE-DIECKS, S.; KAPPELER, P. M.; LANGROCK, R. On the application of mixed hidden Markov models to multiple behavioural time series. **Interface Focus**, 1 fev. 2012.

SIBLY, R. M.; NOTT, H. M. R.; FLETCHER, D. J. Splitting behaviour into bouts. **Animal Behaviour**, v. 39, n. 1, p. 63-69, jan. 1990.

SILVA, E. S. DA; SANTOS, T. V. DOS; HOELLER, A. A.; SANTOS, T. S. DOS; PEREIRA, G. V.; MENEGHELLI, C.; PEZLIN, A. I.; SANTOS, M. M. DOS; FARIA, M. S.; PASCHOALINI, M. A.; MARINO-NETO, J. Behavioral and metabolic effects of central injections of orexins/hypocretins

in pigeons (*Columba livia*). **Regulatory Peptides**, v. 147, n. 1–3, p. 9–18, 10 abr. 2008.

SILVA, J. D. A.; GONÇALVES, W. N. **Modelos Ocultos de Markov Aplicados na Identificação de Comportamento de Animais**. [s.l.] Universidade Católica Dom Bosco, 2007.

SILVA, R. A. DA; OLIVEIRA, S. T. DE; HACKL, L. P. N.; SPILERE, C. I.; FARIA, M. S.; MARINO-NETO, J.; PASCHOALINI, M. A. Ingestive behaviors and metabolic fuels after central injections of 5-HT1A and 5-HT1D/1B receptors agonists in the pigeon. **Brain Research**, v. 1026, n. 2, p. 275–283, 12 nov. 2004.

SILVA, R. A. DA; SILVA, A. S. S. DA; POFFO, M. J.; RIBAS, D. C.; FARIA, M. S.; MARINO-NETO, J.; PASCHOALINI, M. A. Feeding behavior after metergoline or GR-46611 injections into the paraventricular nucleus of the hypothalamus in the pigeon. **Behavioural Brain Research**, v. 179, n. 2, p. 248–257, 16 maio. 2007.

SLATER, P. J. B. The temporal pattern of feeding in the zebra finch. **Animal Behaviour**, v. 22, n. 2, p. 506–515, maio. 1974.

SLATER, P. J. B.; LESTER, N. P. Minimising Errors in Splitting Behaviour into Bouts. **Behaviour**, v. 79, n. 2/4, p. 153–161, 1 jan. 1982.

STEFFENS, S. M.; CASAS, D. C.; MILANEZ, B. C.; FREITAS, C. G.; PASCHOALINI, M. A.; MARINO-NETO, J. Hypophagic and Dipsogenic Effects of Central 5-HT Injections in Pigeons. **Brain Research Bulletin**, v. 44, n. 6, p. 681–688, 1997.

TAUFFER, L.; SPUDEIT, W.; MARINO-NETO, J. **Segmentação de contínuos comportamentais ingestivos usando modelagem por múltiplas exponenciais**. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. p. 2632–2636. Porto de Galinhas: 2012

TOLKAMP, B. J.; ALLCROFT, D. J.; AUSTIN, E. J.; NIELSEN, B. L.; KYRIAZAKIS, I. Satiety Splits Feeding Behaviour into Bouts. **Journal of Theoretical Biology**, v. 194, n. 2, p. 235–250, 21 set. 1998.

VICKERS, S. P.; CLIFTON, P. G. Animal models to explore the effects of CNS drugs on food intake and energy expenditure. **Neuropharmacology**, v. 63, n. 1, p. 124-131, jul. 2012.

ZEIGLER, H. P.; FELDSTEIN, R. A FEEDOMETER FOR THE PIGEON. **Journal of the Experimental Analysis of Behavior**, v. 16, n. 2, p. 181-187, 1971.

ZEIGLER, H. P.; GREEN, H. L.; LEHRER, R. Patterns of feeding behavior in the pigeon. **Journal of Comparative and Physiological Psychology**, v. 76, n. 3, p. 468-477, 1971.

ZEIGLER, H. P.; LEVITT, P. W.; LEVINE, R. R. Eating in the pigeon (*Columba livia*): Movement patterns, stereotypy, and stimulus control. **Journal of Comparative and Physiological Psychology**, v. 94, n. 5, p. 783-794, 1980.

ZORRILLA, E. P.; INOUE, K.; FEKETE, É. M.; TABARIN, A.; VALDEZ, G. R.; KOOB, G. F. Measuring meals: structure of prandial food and water intake of rats. **American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, v. 288, n. 6, p. R1450-R1467, 1 jun. 2005.

ANEXO A - Manual do usuário**Eatômetro - Manual do Usuário**

Autores: Luiz Tauffer
 Yasser Issmail
 José Marino Neto

1 - Sistema para registro automático do comportamento ingestivo de aves

Este manual deverá servir como guia para uso e manutenção do sistema de registro de dados ingestivos de aves. O sistema consiste de 3 módulos principais: módulo de sensoriamento baseado em células de carga, módulo de adequação, digitalização e transmissão dos sinais e módulo computacional de registro e exibição dos dados em tempo real (Figura 1).

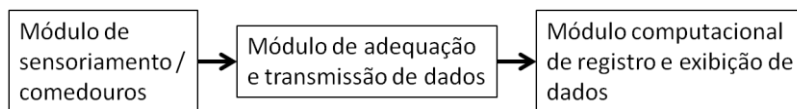


Figura 1 - Diagrama esquemático das etapas do sistema de aquisição e registro de atividade ingestiva.

2 - Sensores

Para o registro da atividade ingestiva dos animais, o sistema de sensoriamento de força deve ser montado sob os alimentadores. O sistema de medição de força é baseado em células de carga (modelo PW6D, HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH) de ponto único, possuem capacidade máxima de 3000 g e frequência natural de 270 Hz (permite amostragem de até 67 Hz). A folha de dados do transdutor encontra-se no APÊNDICE A.

As células de carga estão fixas a estruturas em alumínio para sustentação e fixação (Figura 2-A), e protegidas por carcaças plásticas. Junto à extremidade do sensor são fixadas plataformas de apoio para o pote alimentador. Vasilhames plásticos podem ser adaptados para servir como potes alimentadores. Deve-se levar em consideração mecanismos de encaixe firme e de fácil retirada para limpeza. Os comedouros devem ser dispostos externamente à gaiola, (Figura 2-B), permitindo acesso dos animais à ração/água enquanto evitam outras formas de interação não alimentar (e.g., que o animal bata com o corpo ou defeque sobre o alimentador) que consistiriam em erros de medição. Ao fundo das carcaças plásticas apoios emborrachados (pés) diminuem a interferência de possíveis vibrações na superfície de apoio.

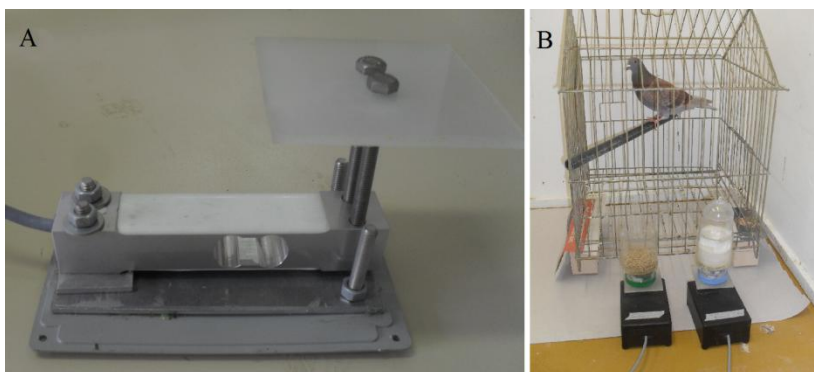


Figura 2 - Transdutor fixado à estrutura de alumínio e plataforma de apoio, sem a carcaça plástica de proteção (A). Montagem transdutor/comedouro com disposição junto às gaiolas dos animais (B).

As células de carga são alimentadas com 10 V e possuem tensão de saída de 2 mV/V para carga nominal, isto é, se alimentadas com 10 V e submetidas à cargas variando de 0-3000 g terão tensão de saída

variando de 0-20 mV. O sensor possui ainda fios para compensação de perdas de tensão pela resistência dos cabos de ligação.

É indicado que os alimentadores sejam moldados de forma a diminuir o desperdício, porém as ações dirigidas ao alimento dos pombos causam inevitavelmente espalhamento de grãos de ração para fora do alimentador. Para evitar que os animais voltem a atenção para grãos espalhados pelo chão (e, portanto, realizem atividade ingestiva fora do alcance do sensor) é recomendado que as gaiolas sejam mantidas a alturas de aproximadamente 15 cm do chão, de forma que os animais não tenham acesso a nenhum grão fora do alimentador.

3 - Placa de aquisição

As células de carga se conectam ao segundo módulo, este consistindo de duas etapas: etapa de tratamento de sinal analógico e etapa de digitalização e transmissão dos dados, Figura 3. Na placa analógica o sinal é primeiramente amplificado em 28.4 V/V por um amplificador de instrumentação (AD620, Analog Devices) com rejeição de modo comum de aproximadamente 120 dB. Em seguida passa por uma segunda etapa de amplificação em 27 V/V, totalizando o valor de ganho aproximado de 768 V/V. O sinal ainda passa por um filtro passa-baixas com frequência de corte em 48 Hz para filtragem de possível interferência da rede elétrica.

Como exemplo, uma variação de 1 g no peso sobre o comedouro provoca uma variação de 6.67 μV na saída do transdutor e de, aproximadamente, 5.12 mV após a etapa de amplificação.

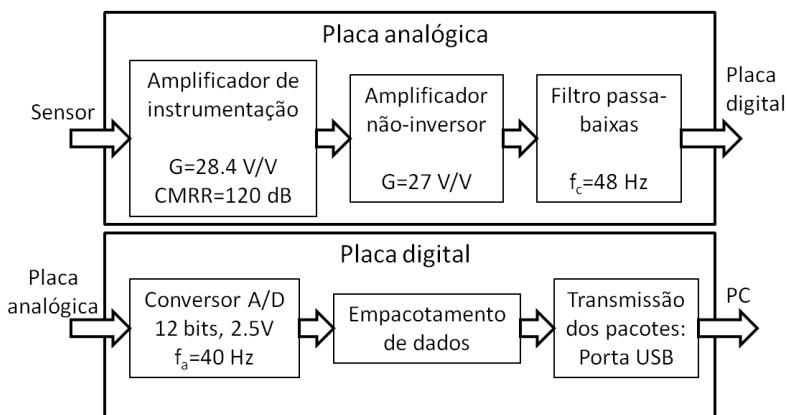


Figura 3 - Diagrama esquemático da etapa de pré-tratamento do sinal: placa analógica e placa digital do módulo de adequação e transmissão de dados.

O sinal amplificado e filtrado é então amostrado a uma taxa de 40 Hz para cada canal (cada transdutor). Os sinais analógicos passam por um conversor A/D 12 bits ($2^{12} = 4096$ intervalos ou passos de quantização) com limite superior de 2.5 V, o que equivale a uma variação de aproximadamente 488 g no comedouro. Este é um limite de peso confortável para os experimentos com pombos, uma vez que as ingestões diárias de ração e água destes animais usualmente se mantêm na ordem de cinco vezes menor que este valor. Para trabalhar com

valores mais amplos, é necessário alterar os valores de ganho dos amplificadores da etapa analógica, Figura 5.

A placa responsável pela conversão analógica/digital e transmissão é microcontrolada (ADUC7026, Analog Devices). Os dados digitalizados são empacotados de acordo com o protocolo ilustrado pela Figura 4, onde BI é o byte de início de pacote, BN é o byte endereçador do transdutor, B+ e B- são os bytes mais e menos significativos contendo o valor da medição de peso, R1, R2 e R3 são bytes reservados para uso futuro e CS é o byte de checksum para checagem de erros.

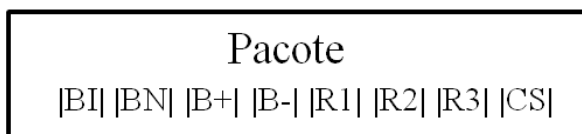


Figura 4 - Protocolo de montagem de pacotes para transmissão digital dos dados.

O dispositivo de comunicação associado à placa digital (UM232R, Future Technology Devices International Limited) transmite os pacotes de dados através de porta USB ao sistema computacional responsável pelo registro e exibição dos dados.

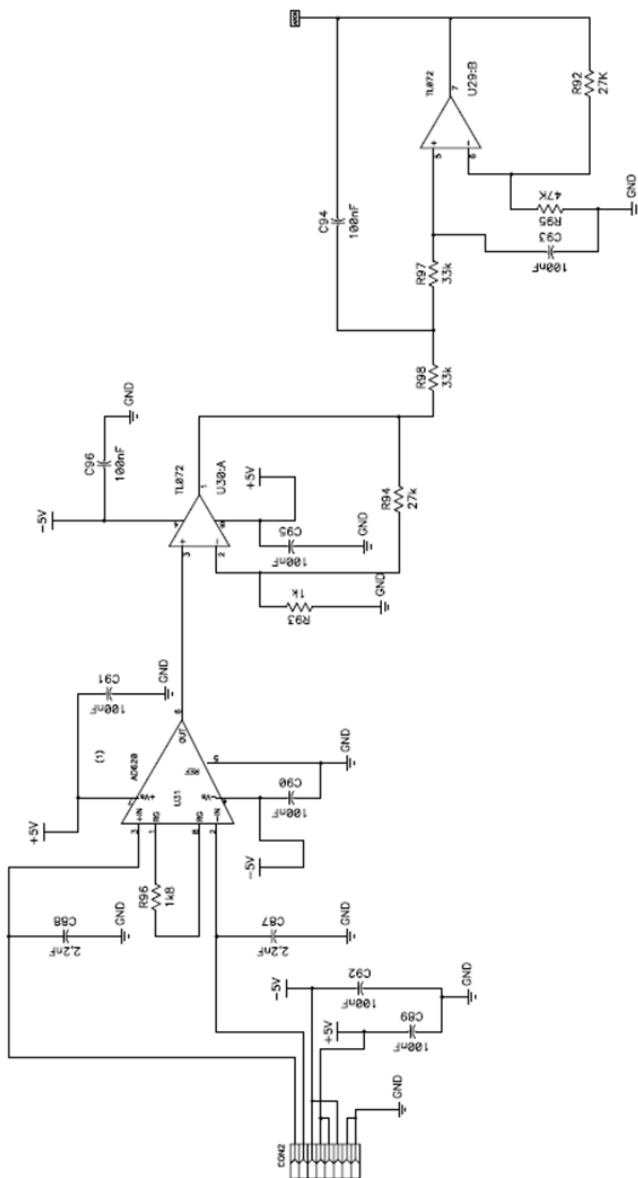


Figura 5 - Diagrama esquemático do circuito de amplificação e filtragem analógica.

4 - Software

O software para registro, visualização e controle dos dados de experimentos foi desenvolvido em plataforma LabVIEW. O programa possui duas funcionalidades: Calibração e Registro.

4.1 Instalação

O programa deve ser utilizado em máquina com sistema operacional Windows. Antes da utilização do programa, devem ser instalados os drivers do módulo de comunicação FTDI (VCP e D2XX). O manual de instruções e os instaladores estão disponíveis em: <http://www.ftdichip.com/FTDrivers.htm>. O módulo de aquisição do Eatômetro deverá estar ligado conectado ao computador. Siga as instruções do manual de instalação.

4.2 Modo Calibração

Neste modo é feita a calibração de cada balança por vez. Uma vez que o software não lê diretamente o valor de peso, mas sim o sinal elétrico proveniente da placa de aquisição, a calibração é uma etapa fundamental, pois informa ao programa a relação entre o sinal elétrico lido pelo sistema e o valor real de peso aplicado ao sensor. Por exemplo, com um peso de X_1 gf de ração ou água em um comedouro, o sistema irá ler um sinal de intensidade Y_1 . Aumentando o peso sobre este mesmo comedouro para X_2 gf o sinal lido terá intensidade Y_2 e, aumentando novamente para X_3 gf, o sinal lido terá intensidade Y_3 , como mostrado na Figura 6.

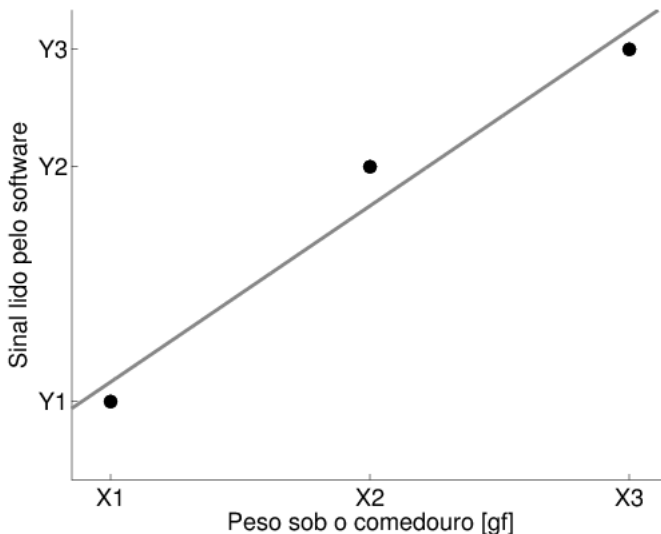


Figura 6 - Pontos de calibração em círculos pretos e reta de calibração calculada.

Por regressão linear tem-se os coeficientes ‘a’ e ‘b’ da reta que melhor se ajustam a estes pontos, $Y = a * X + b$. Estes coeficientes são individualmente calculados para cada sensor. Portanto, quando o software receber um sinal de intensidade Y, o valor de X será conhecido com $X = (Y - b)/a$.

A Figura 7 mostra a interface gráfica do modo de calibração. Para calibrar o sinal de cada sensor, deve-se proceder da seguinte forma:

- 1- Conectar todos os sensores à placa, ligar a placa e iniciar o software;
- 2- Verificar se o sinal de ‘Dispositivo conectado’ está aceso;
- 3- Selecionar a opção ‘CALIBRAÇÃO’;
- 4- Caso já possua um arquivo com valores de calibração previamente salvo, selecionar a opção ‘Carrega valores de calibração’, escolha o arquivo e a etapa de calibração estará concluída;
- 5- Caso não possua o arquivo, ou deseje criar novos valores de calibração, entre com os valores de peso a serem colocados sobre o comedouro, exemplo: 50 g, 100 g e 150 g.
- 6- A cada peso colocado, entre com o valor relacionado no campo referente à célula de carga e pressione ‘OK’; O sinal luminoso ao lado do valor deverá acender;

- 7- Repita o procedimento para as células de carga restantes;
- 8- Selecione a opção ‘Salvar e sair’;
- 9- Um arquivo contendo os valores de calibração será gerado e poderá ser utilizado na etapa 4 em aquisições futuras.

Instruções:
Os valores (g) devem ser inseridos um por vez e enviados com o botão OK somente quando o peso estiver sobre a referida balança.

Balança 1	Balança 2	Balança 3	Balança 4	Balança 5	Balança 6
50 OK	50 OK	50 OK	50 OK	50 OK	50 OK
100 OK	100 OK	100 OK	100 OK	100 OK	100 OK
150 OK	150 OK	150 OK	150 OK	150 OK	150 OK

Carrega valores de calibração Salvar e sair

Figura 7 - Interface gráfica da funcionalidade de calibração do software.

4.3 Modo Registro

Neste modo, o software se conecta ao módulo transmissor para leitura contínua dos dados. Os valores medidos em cada balança, ao serem lidos pelo programa, são previamente filtrados, exibidos em tela em tempo real e registrados em arquivo. A interface tem a proposta de ser intuitiva e direta (Figura 8), consistindo em:

- 1- Escolha de quais balanças serão usadas;
- 2- Escolha do diretório onde os arquivos de dados serão guardados;
- 3- Comentários do pesquisador para o cabeçalho dos arquivos;
- 4- Sinal luminoso de indicação de detecção do dispositivo;
- 5- Campos para definição de horário para início e término automáticos do registro;
- 6- Opção de início manual do registro;
- 7- Modo Calibração;
- 8- Opção de término manual do registro;
- 9- Campo para marcação de eventos ao decorrer do experimento;
- 10- Indicativo grosseiro da quantidade de alimento e água ingeridos até o instante atual (não é capaz de identificar quanto foi desperdiçado);

- 11- Exibição em tempo real (atualização a cada 250 ms) com os valores de peso medidos em cada balança.

Os gráficos são facilmente manipuláveis com ampliação, afastamento e livre movimentação para visualização de valores passados. Os dados são salvos em arquivos .csv (valores separados por vírgula) e também em arquivos .lvm, extensão própria do software Labview que torna mais fácil o posterior tratamento dos dados pelo programa. Os arquivos com extensão .lvm também possuem a vantagem de serem facilmente convertidos em arquivos de texto simples (.txt com valores separados por tabulação), facilitando muito o tratamento dos mesmos por softwares como Matlab ou GNU Octave.



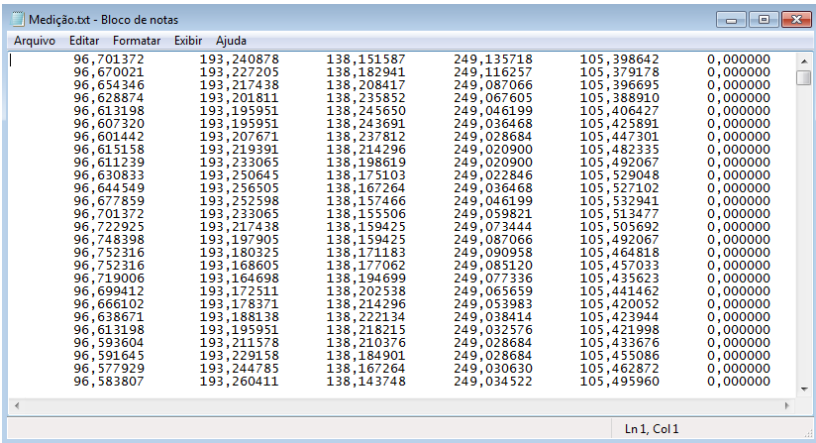
Figura 8 - Interface gráfica da funcionalidade de registro do software.

5 - Arquivos de dados

Os valores medidos nas balanças são registrados em dois tipos de arquivo: ‘Registro.lvm’ e ‘Registro.csv’.A cada duas horas de registro contínuo, arquivos sequenciais são criados, e.g. Registro_1, Registro_2, etc.

Os arquivos .csv, além dos valores registrados, contém data, hora, comentários e marcação de eventos. Estes arquivos são, preferencialmente, usados para trabalhar em *Excel*.

Os arquivos .lvm possuem apenas os valores numéricos das medições de cada balança usada, sendo cada coluna associada a uma balança. Estes arquivos são ideais para análises posteriores realizadas tanto em LabVIEW quanto em Matlab. Para análises usando Matlab, recomenda-se a alteração da extensão .lvm para .txt e a substituição das vírgulas decimais por pontos (no Bloco de notas ir em Editar/Substituir). A Figura 9 ilustra como fica o arquivo de registro.



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda			
96,701372	193,240878	138,151587	249,135718	105,398642	0,000000		
96,670021	193,227205	138,182941	249,116257	105,379178	0,000000		
96,654346	193,217438	138,208417	249,087066	105,396695	0,000000		
96,628874	193,201811	138,235852	249,067605	105,388910	0,000000		
96,613198	193,195951	138,245650	249,046199	105,406427	0,000000		
96,607320	193,195951	138,243691	249,036468	105,425891	0,000000		
96,601442	193,207671	138,237812	249,028684	105,447301	0,000000		
96,615158	193,219391	138,214296	249,020900	105,482335	0,000000		
96,611239	193,233065	138,198619	249,020900	105,492067	0,000000		
96,630833	193,250645	138,175103	249,022846	105,529048	0,000000		
96,644549	193,256505	138,167264	249,036468	105,527102	0,000000		
96,677859	193,252598	138,157466	249,046199	105,532941	0,000000		
96,701372	193,233065	138,155506	249,059821	105,513477	0,000000		
96,722925	193,217438	138,159425	249,073444	105,505692	0,000000		
96,748398	193,197905	138,159425	249,087066	105,492067	0,000000		
96,752316	193,180325	138,171183	249,090958	105,464818	0,000000		
96,752316	193,168605	138,177062	249,085120	105,457033	0,000000		
96,719006	193,164698	138,194699	249,077336	105,435623	0,000000		
96,699412	193,172511	138,202538	249,065659	105,441462	0,000000		
96,666102	193,178371	138,214296	249,053983	105,420052	0,000000		
96,638671	193,188138	138,222134	249,038414	105,423944	0,000000		
96,613198	193,195951	138,218215	249,032576	105,421998	0,000000		
96,593604	193,211578	138,210376	249,028684	105,433676	0,000000		
96,591645	193,229158	138,184901	249,028684	105,435086	0,000000		
96,577923	193,244785	138,167264	249,030630	105,452872	0,000000		
96,583807	193,260411	138,143748	249,034522	105,495960	0,000000		

Figura 9 - Arquivo .txt com resultados do registro.

6 - Manutenção e conservação

Para o bom funcionamento do equipamento e conservação do mesmo, algumas práticas devem ser observadas.

Para ligar o sistema:

- 1- Conecte todas as balanças às entradas da placa;
- 2- Caso não sejam utilizados todos os transdutores, conectar os protetores às entradas em aberto.
- 3- Conecte o cabo de comunicação USB ao computador;
- 4- Ligue o aparelho na rede de 220 V;
- 5- Pressione o botão de ligar/desligar do aparelho (a luz verde deverá acender);
- 6- Execute o software de registro.

Para desligar o sistema:

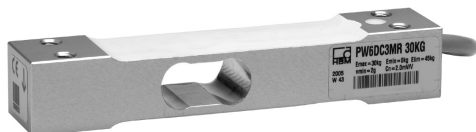
- 1- Termine a execução do software de registro;
- 2- Pressione o botão de ligar/desligar do aparelho (a luz verde deverá apagar);
- 3- Desconecte o cabo USB do computador e o aparelho da tomada;
- 4- Desconecte as balanças da placa.

É importante manter sempre as balanças limpas. Eventualmente grãos de ração podem cair para dentro da caixa protetora e devem ser retirados após o experimento. É recomendado que se refaça a etapa de calibração a cada 2 meses de uso contínuo, ou sempre após alguma mudança na configuração comedouro/sensor (exemplo, afixar um tipo diferente de pote comedouro ou reapertar os parafusos ligados ao sensor).

APÊNDICE A - Folha de dados dos transdutores

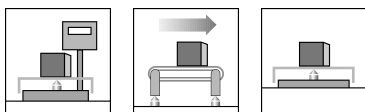
PW6D...

Single point load cells



Special features

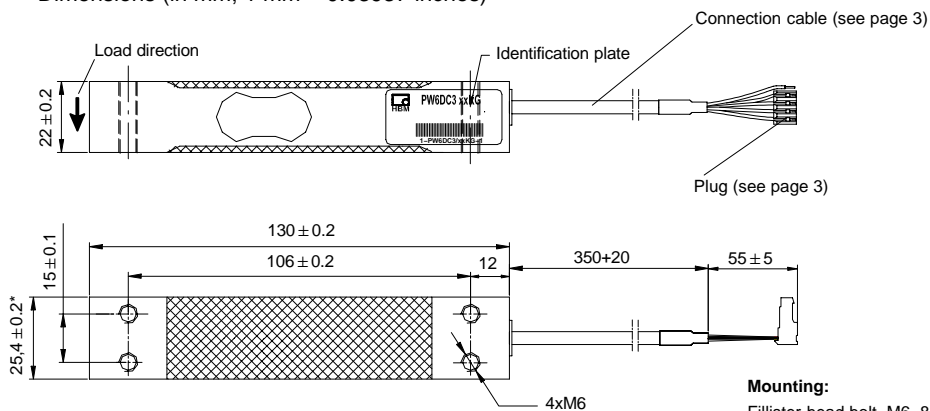
- Accuracy class C3 with OIML-R60 test report
- Max. capacities: 3 kg ... 40 kg
- Off center load compensated (OIML R 76)
- Degree of protection IP67 (according to EN 60 529)
- Shielded connection cable
- Optimized for dynamic weighing applications



Optional:

- Connection cable in six wire circuit
- Different cable lengths
- Aligned output, suitable for connection in parallel

Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)



* PW6DC3MR/40 kg: 30

Mounting:

Fillister-head bolt M6–8.8
Tightening torque: 10 N·m

Specifications

Type		PW6D...						
Accuracy class ¹⁾		C3, C3MR						
Maximum number of load cell intervals (n_{LC})		3000						
Maximum capacity (E_{max})	kg	3	5	10	15	20	30	40
Minimum LC verification interval (v_{min}), (Accuracy class C3)	g	0.5	1	2	2	5	5	10
Temperature effect on zero balance (TK_0), (Accuracy class C3)	% of C_n / 10 K	± 0.0233	± 0.0280	± 0.0280	± 0.0186	± 0.0350	± 0.0233	± 0.0350
Minimum LC verification interval (v_{min}), (Accuracy class C3MR)	g	0.2	0.5	1	1	2	2	5
Temperature effect on zero balance (TK_0), (Accuracy class C3MR)	% of C_n / 10 K	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0175
Max. platform size	mm	300 x 300						
Sensitivity (C_n)	mV/V	2.0 ± 0.2						
Zero signal		0 ± 0.1						
Temperature effect on sensitivity (TK_C) ²⁾ in the temperature range +20 ... +40 °C [+68 ... +104 °F] -10 ... +20 °C [+14 ... +68 °F]	% of C_n / 10 K	± 0.0175 ± 0.0117						
Relative reversibility error (d_{hy}) ²⁾	% of C_n	± 0.0166						
Non-linearity (d_{lin}) ²⁾		± 0.0166						
Ratio of minimum dead load output return (DR)		± 0.0166						
Off-center load error ³⁾		± 0.0233						
Input resistance (R_{LC})	Ω	380 ± 38						
Output resistance (R_0)		380 ± 38						
Reference excitation voltage (U_{ref})	V	5						
Nom. range of excitation voltage (B_U)		1 ... 12						
Isolation resistance (R_{is}) at 100 V _{DC}	GΩ	> 2						
Nominal (rated) range of ambient temperature (B_T)	°C [°F]	-10 ... +40 [+14 ... +104]						
Operating temperature range (B_{li})		-10 ... +50 [+14 ... +122]						
Storage temperature range (B_{li})		-25 ... +70 [-13 ... +158]						
Limit load (E_L) ^{*)}	% of E_{max}	150						
^{*)} at max. eccentricity	mm	100						
Lateral load limit (E_{li}), static	%	300						
Breaking load (E_d)	of E_{max}	300						
Nominal (rated) displacement at E_{max} (S_{nom}), approx.	mm	< 0.18	< 0.18	< 0.19	< 0.21	< 0.23	< 0.28	< 0.29
Natural frequency, approx.	Hz	270	390	500	600	675	760	790
Weight (G), approx.	kg	0.25						
Degree of protection acc. to EN 60 529 (IEC 529)		IP67						
Material: Measuring body Application protection Cable sheath		Aluminum Silicone caoutchouc PVC						

¹⁾ According to OIMLR60 with $P_{LC} = 0.7$

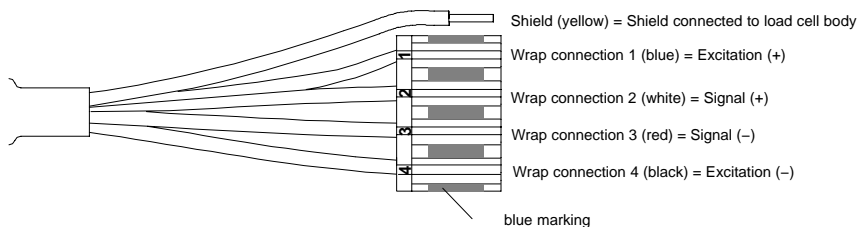
²⁾ The values for linearity deviation (d_{lin}), relative reversibility error (d_{hy}) and temperature effect on sensitivity (TK_C) are recommended values. The sum of these values remain within the cumulated error limit acc. to OIML R60.

³⁾ Nach OIML R76

Wiring code

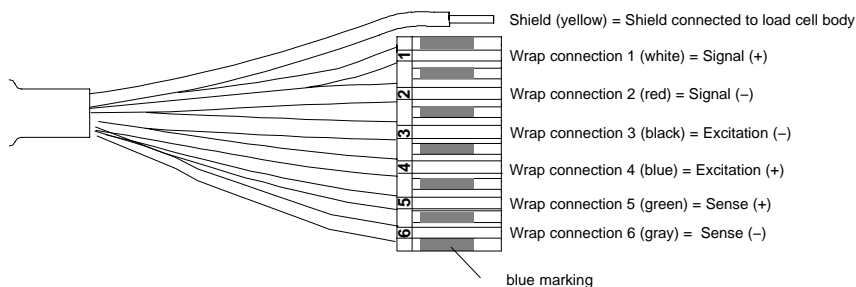
Connection with 4 wire cable (cable length: 0.35 m)

Detailed description of the Pancon plug (CE100F26-4), 4-pole



Connection with 6 wire cable (cable length, selectable: 0.35 m; 1.5 m; 3 m; 6 m)

Detailed description of the Pancon plug (CE100F26-6), 6-pole



Ordering designations

PW6D... (Aluminum)

Type	PW6D		
Accuracy	C3 (OIML)		
Note	Cable length 0.35m (4 wire)		
Capacity	Order no.		
3kg	1-PW6DC3/3KG-1		
5kg	1-PW6DC3/5KG-1		
10kg	1-PW6DC3/10KG-1		
15kg	1-PW6DC3/15KG-1		
20kg	1-PW6DC3/20KG-1		
30kg	1-PW6DC3/30KG-1		
40kg	1-PW6DC3/40KG-1		

K-PW6D... (Aluminum), optional versions

Order no.

K-PW6D

Code	Option 1: Mechanical version	
N	-	

Code	Option 2: Accuracy	
C3	C3 (OIML)	
MR	C3-MR (OIML)	

Code	Option 3: Capacity	
3	3kg	
5	5kg	
10	10kg	
15	15kg	
20	20kg	
30	30kg	
40	40kg	

Code	Option 4: NN	
N	-	

Code	Option 5: Cable length	
4_0.35	0.35m (4 wire)	
6_0.35	0.35m (6 wire)	
6_1.5	1.5m (6 wire)	
6_3	3m (6 wire)	
6_6	6m (6 wire)	

Code	Option 6: Miscellaneous	
N	without	
A	2mV/V ±0.1% / 410 Ohms ±0.3 Ohms (aligned output, suitable for connection in parallel)	

K-PW6D - N - - - - N - - - - -

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only. They are not to be understood as express warranty and do not constitute any liability whatsoever.

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Im Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt, Germany
Tel.: +49 6151 803-0 Fax: +49 6151 803 9100
Email: support@hbm.com Internet: www.hbm.com



measurement with confidence